

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

台灣東部花蓮地區米崙活動斷層之

古地震研究

Paleoseismic Study of Milun Active Fault in

Hualien, Eastern Taiwan

研究生：曾雅筑

Student: Ya-Chu Tseng

指導教授：黃文正 博士

Advisor: Wen-Jeng Huang, Ph. D.

中華民國 一 百 零 八 年 六 月

June, 2019



國立中央大學圖書館 碩博士論文電子檔授權書

(104 年 5 月最新修正版)

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

()同意 (立即開放)

()同意 (請於西元 _____年____月____日開放)

()不同意，原因是：_____

在國家圖書館「臺灣博碩士論文知識加值系統」

()同意 (立即開放)

()同意 (請於西元 _____年____月____日開放)

()不同意，原因是：_____

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

研究生簽名：曾雅娟 學號：106624014

論文名稱：台灣東部花蓮地區米崙活動斷層之古地震研究

指導教授姓名：黃文正

系所：應用地質研究所 博士班 碩士班

填單日期：2019.07.23

備註：

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

國立中央大學碩士班研究生

論文指導教授推薦書

應用地質 學系/研究所 曾雅筑 研究生所
提之論文 台灣東部花蓮地區米崙活動斷層之古
地震研究

係由本人指導撰述，同意提付審查。

指導教授 蘇文正 (簽章)

108 年 7 月 23 日

國立中央大學碩士班研究生
論文口試委員審定書

____應用地質____學系/研究所__曾雅筑__研究生
所提之論文

台灣東部花蓮地區米崙活動斷層之古地震研究

經本委員會審議，認定符合碩士資格標準。

學位考試委員會召集人

楊志成

委

員

黃詔哲

陳文山

翁辰毅

蓋文正

中華民國 108 年 7 月 4 日

台灣東部花蓮地區米崙活動斷層之古地震研究

中文摘要

台灣花東縱谷地區位於歐亞板塊與菲律賓海板塊之板塊縫合帶，地震活動頻繁，而近百年內至少有兩起地震造成花東縱谷向北延伸之米崙斷層沿線出現地表破裂，並導致房屋損害與人民傷亡，此兩起地震分別為 1951 年 10 月 22 日 M_L 7.3 的縱谷地震及 2018 年 2 月 6 日 M_w 6.4 的花蓮地震，顯示米崙斷層為致災性活動斷層。米崙斷層過去並未有斷層露頭的報導，缺少斷層相關的資料，本研究選定 2018 花蓮地震出現雁行破裂跡之花蓮空軍基地內米崙線型之斜坡坡腳進行槽溝開挖，並以 4 口地質鑽井為輔，藉以獲得斷層位態與解析米崙斷層古地震事件，並進一步推估地震再現週期與斷層垂直錯移速率。本研究共開挖三個槽溝，由兩個相互重疊槽溝合併之主要槽溝共二階，長約 36 米，寬約 4 米，深約 7 米，底部另加挖 1.5 米深，約 3 米寬的坑，槽溝剖面出露米崙斷層之主斷層以 80 度向東傾，更西側的分支斷層則以 36 度、56 度及 70 度向東傾。槽溝出露之楔形崩積體、褶曲生長地層及液化現象為古地震相關之現象，將剖面進行回復與剝除並配合定年結果，可推得過去三千年至少有五次的古地震事件紀錄於此槽溝內，除 2018 花蓮地震及 1951 縱谷地震外，尚有 790-144 cal yr BP、2360-1301 cal yr BP、3980-2306 cal yr BP 有地震紀錄，而五次古地震事件之時間間隔顯示米崙斷層發生地震之時間可能較不規律，說明此斷層可能未具有規律的地震再現週期。本研究中 4 口鑽井岩芯經岩性對比後推測主斷層垂直錯移量約 17.9-18.6 米，並估算出近米崙斷層的最大垂直錯移速率約為 2.9-3.4 mm/yr。

關鍵字：2018 花蓮地震、米崙斷層、古地震

Paleoseismic Study of Milun Active Fault in Hualien, Eastern Taiwan

Abstract

The Milun fault is the northern extension part of the Longitudinal valley which is the suture between the Philippine Sea plate and the Eurasian plate on the Taiwan Island. The Milun fault relates to two destructive earthquakes on October 22nd, 1951, and February 6th, 2018, respectively. The 1951 M_L 7.3 earthquake and the 2018 M_W 6.4 earthquake both produced surface ruptures along the Milun fault, causing casualties and damage on buildings in the Hualien city. Although the Milun Fault is surely a hazardous fault, the subsurface configuration and history of this active fault remain little exposed. The purpose of this study is to uncover the fault at shallow depth, reason the activity and seismic history of the Milun Fault and estimate the recurrence interval. Three trenches and four boreholes were carried out at the Hualien Air-Force Base, where surface ruptures were reported during the 2018 earthquake. The main trench with two stages is 36 m in length, 4 m in width, and 7 m in depth. The Milun main fault revealed on the trench wall dips 80° to the east, and its branch faults dip 36° , 56° , and 70° to the east, respectively. Some clues are related to paleoseismic events, including the colluvial wedges, folded growth strata, and liquefaction. By compiling the results of restoration and stripping of strata in conjunction with the age constraints, five paleo-earthquake events associated with the Milun Fault are resolved: (1) the 2018 event (2) the 1951 event and the earlier ones occurred at (3) 790-144 cal yr BP (4) 2360-1301 cal yr BP (5) 3980-2306 cal yr BP. The intervals between each paleo-

earthquake events indicate that the recurrence interval of the Milun fault might be irregular. Further investigation will be needed to evaluate the recurrence interval of the Milun fault. Based on the borehole data, the throw component of the Milun fault is 17.9-18.6 m. Combined with the dating result, the maximum uplift rate of the Milun fault is 2.9-3.4 mm/yr.

Keywords: 2018 Hualien earthquake 、 Milun fault 、 Paleoseismology

誌謝

兩年的碩士生活過得很快，一轉眼就要結束人生中的一個重要的里程碑，本篇論文能夠順利進行與完成，首先要感謝我的指導教授黃文正老師在研究上給予我許多寶貴的建議與幫助，也常與我分享一些自身經驗及想法。感謝陳文山教授願意給予重要且豐富的研究資料讓我的研究能順利完成，感謝我的口試委員顏君毅教授、韶怡學姐與中油的楊志成組長都給予我的研究許多建議、想法與肯定。

在地質力學研究室待了兩年，謝謝大學長一勤學長給我研究上莫大的幫助與建議，謝謝師母 Maryline 時常關心我的研究也給了我許多建議，謝謝研究室的芊翔學長、承恩學長、小波學長與奕維學長常給我一些建議與指導，還有彥如跟于鈞常常在晚上或假日一起在研究室奮鬥，謝謝我的同學毓呈、以及智偉、廷瑜辛苦的跟我一起在花蓮挖槽溝，謝謝研究室的各位的陪伴，讓我生活不無聊乏味。

謝謝中央女籃的大家，不只給我一個運動的去處，跟妳們相處聊天也是非常歡樂。謝謝秀國不只給我研究上的建議與幫助，也常常協助我解決許多的難題，最重要的是陪伴我度過每一個大大小小難關，讓我順利的畢業。謝謝父母與弟弟對於我想做的事給予支持與鼓勵。謝謝碩士旅途上每一位給予我幫助與鼓勵的人們，有你們才有這篇論文的完成。

目錄

中文摘要	i
Abstract	ii
誌謝	iv
目錄	v
圖目錄	viii
表目錄	xii
第一章 緒論	1
1-1 前言	1
1-2 研究動機與目的	4
第二章 研究區域概述	5
2-1 地體構造	5
2-2 區域地質概況	7
2-2-1 地形	7
2-2-2 地層	12
2-2-3 地質構造	13
第三章 前人研究	22
3-1 2018 年 2 月 6 日花蓮地震相關研究	22
3-1-1 花蓮地區同震地表變形	22
3-1-2 致震斷層探討及同震變形	29
3-2 2018 花蓮地震震前之古地震研究	32
3-2-1 1951 年地震地表破裂	32
3-2-2 米崙斷層古地震槽溝研究	32
3-3 米崙斷層的地震再現週期與長期抬升速率	39

3-3-1 地震再現週期	39
3-3-2 長期抬升速率	39
第四章 研究方法	41
4-1 跨斷層槽溝開挖	41
4-1-1 槽溝選址	41
4-1-2 開挖流程	47
4-2 碳 14 定年法	50
4-2-1 ^{14}C 分析方法分類	50
4-2-2 ^{14}C 半衰期	51
4-3 地質鑽井	52
第五章 槽溝與鑽井結果	53
5-1 1 號槽溝	53
5-1-1 沉積層描述與分類	56
5-1-2 構造描述	68
5-1-3 標本定年結果	75
5-2 2 號槽溝	82
5-2-1 沉積層與構造描述	87
5-2-2 標本定年結果	94
5-3 鑽井岩心描述	96
5-3-1 岩心分層	96
5-3-2 岩心對比	98
5-4 古地震事件判斷依據	104
第六章 討論	106
6-1 古地震事件分析	106

6-2 地震再現週期分析	114
6-3 斷層垂直錯移速率分析	116
第七章 結論	117
參考文獻	119
附錄一 標本定年年代校正結果	124
附錄二 鑽井岩心照片與分層	128

圖目錄

圖 1	台灣地體構造立體示意圖.....	2
圖 2	中央氣象局 2018 年 2 月 6 日花蓮地震報告圖(摘自中央氣象局)....	3
圖 3	台灣周圍地體構造圖(修改自 Shyu et al., 2005).....	6
圖 4	縱谷北端花蓮地區陸域 20 米數值模擬地形圖.....	9
圖 5	花蓮地區各類地形圖(摘自鍾令和, 2004).....	10
圖 6	花蓮地區的活動層分佈(摘自石再添等, 1983).....	10
圖 7	米崙台地區域地質圖(修改自林啟文等, 2009).....	15
圖 8	震測測線分布圖與測線 04P-MLF-HL-4 之震測解釋剖面(摘自廖宏祥, 2006).....	16
圖 9	東部縱谷北段斷層分佈及海底地形圖(after Shyu et al., 2005).....	17
圖 10	縱谷北端區域的構造分布圖(modified from Shyu et al., 2016).....	18
圖 11	縱谷北端地下構造模型(after Shyu et al., 2016).....	19
圖 12	米崙台地上活動斷層分布圖(摘自林明聖和蕭謙麗, 1998).....	20
圖 13	米崙台地的橫移斷層模型圖(摘自林明聖和蕭謙麗, 1998).....	21
圖 14	米崙斷層地表破裂調查分布圖(摘自中央地質調查所, 2018).....	24
圖 15	七星潭南側砂礫灘之地表破裂(摘自中央地質調查所, 2018).....	25
圖 16	七星山西側步道之破裂(摘自中央地質調查所, 2018).....	25
圖 17	嶺頂斷層北段破裂調查分布圖(摘自中央地質調查所, 2018).....	26
圖 18	花蓮大橋附近破裂跡與噴砂孔(摘自中央地質調查所, 2018).....	27
圖 19	2018 花蓮地震災害分布圖(after Huang et al., 2019).....	27
圖 20	破裂帶照片與構造描繪圖(after Huang et al., 2019).....	28
圖 21	2018 花蓮地震之 GPS 同震位移變形(after Yang et al., 2018).....	30
圖 22	2018 花蓮地震同震及震後的斷層模型(after Yang et al., 2018).....	30

圖 23	聯合震源逆推結果之滑移量分布圖(after Lee et al., 2018).....	31
圖 24	1951 年地震於花蓮地區造成之地表破裂跡(摘自朱傲祖和游明聖， 1995).....	34
圖 25	米崙斷層古地震研究之槽溝位置圖(修改自陳文山等，2012).....	35
圖 26	花蓮機場內東側崖邊槽溝北牆剖面(摘自陳文山，2004).....	36
圖 27	花蓮機場內東側崖邊槽溝南牆剖面(摘自陳文山，2004).....	36
圖 28	花蓮機場內東側崖邊槽溝東南側之水平砂層露頭(摘自陳文山， 2004).....	37
圖 29	花崗山西側槽溝及井位分佈(摘自陳文山等，2012).....	37
圖 30	花崗山槽溝二號槽溝北牆剖面(摘自陳文山等，2012).....	38
圖 31	花崗山槽溝二號槽溝南牆剖面(摘自陳文山等，2012).....	38
圖 32	花崗山槽溝一號槽溝北牆剖面(摘自陳文山等，2012).....	38
圖 33	東華大學美崙校區操場之雁行排列破裂跡(摘自中央地質調查所， 2018).....	43
圖 34	槽溝位置之雁行排列破裂跡.....	43
圖 35	槽溝與鑽井位置分布圖及雁行排列地表破裂跡.....	44
圖 36	1a 槽溝全景圖.....	45
圖 37	1b 槽溝全景圖.....	45
圖 38	2 號槽溝全景圖.....	46
圖 39	槽溝開挖過程.....	48
圖 40	溝壁清理.....	48
圖 41	設置水平及垂直網格線.....	49
圖 42	PIX4D 軟體合成之 3D 槽溝影像.....	49
圖 43	BH-02、BH-03 與 BH-04 分布圖.....	52

圖 44	1 號槽溝正射影像圖	54
圖 45	1a 槽溝南牆照片	55
圖 46	1b 槽溝南牆照片	55
圖 47	泥質礫岩(Unit 9)與砂質礫石層(Unit 8).....	59
圖 48	七星潭海岸的米崙鼻礫岩	60
圖 49	深灰色中砂層(Unit 7).....	60
圖 50	中砂-粗砂層偶夾薄礫石層(Unit 6a、6b).....	61
圖 51	1a 槽溝東牆的中砂層夾薄礫石層(Unit 6a)	61
圖 52	碳質黑色泥層(Unit 5).....	62
圖 53	延續性不佳之碳質黑色泥層(Unit 5).....	62
圖 54	1b 槽溝的楔形崩積層(Unit 4 及 Unit 2).....	63
圖 55	逆斷層相關之崩積楔形體形成過程.....	64
圖 56	泥質細砂層、土壤化泥質細砂層及鬆散中砂層(Unit 3a-3e).....	65
圖 57	Unit 3c 砂體	66
圖 58	深棕色有機泥層(Unit 1)	66
圖 59	1 號槽溝西牆及東牆解釋圖.....	67
圖 60	槽溝西牆的主斷層露頭.....	70
圖 61	槽溝西牆的分支斷層露頭.....	71
圖 62	槽溝東牆的主斷層與剪切面露頭.....	72
圖 63	槽溝東牆的分支斷層露頭.....	73
圖 64	Unit 3a、Unit 3b、Unit 3c 向上逐漸褶曲之角度變化.....	74
圖 65	1 號槽溝西牆定年標本編號與定年結果.....	76
圖 66	1 號槽溝東牆定年標本編號與定年結果.....	77
圖 67	1 號槽溝南牆定年標本編號與定年結果.....	78

圖 68	2 號槽溝橫跨 2018 花蓮地震地表破裂跡.....	83
圖 69	埋於 2 號槽溝內的擋土牆。.....	84
圖 70	2 號槽溝正攝影像圖.....	85
圖 71	2 號槽溝東牆剖面.....	86
圖 72	2 號槽溝北牆與南牆解釋圖.....	89
圖 73	近擋土牆之陷落沉積層.....	90
圖 74	2 號槽溝南牆剖面的正移斷層.....	91
圖 75	2 號槽溝北牆剖面的正移斷層.....	92
圖 76	小型正移斷層於逆斷層上盤的形成機制(after Ameen, 1990).....	93
圖 77	2 號槽溝標本採樣位置與定年結果.....	95
圖 78	岩心分層-中砂及粗砂層.....	99
圖 79	鈣質膠結粗砂層.....	99
圖 80	岩心分層-中砂層夾薄礫石層.....	100
圖 81	岩心分層-淘選度差之礫石層.....	100
圖 82	BH-02 中 4.8-5 米深之淘選度差礫石層.....	101
圖 83	BH-02 夾有礫石之深色泥質及粉砂質沉積物.....	101
圖 84	BH-03 及 BH-04 中的黑色含碳泥層.....	102
圖 85	跨米崙斷層之鑽井剖面與分層.....	103
圖 86	區域地層柱及沉積年代.....	110
圖 87	1 號槽溝西牆剖面之構造回復圖(事件一~事件三).....	111
圖 88	1 號槽溝西牆剖面之構造回復圖(事件四~事件五).....	112
圖 89	1 號槽溝東牆剖面之構造回復圖.....	113
圖 90	古地震事件年代間隔分布圖.....	115

表目錄

表 1	花蓮市外海區域之災害地震列表(摘自中央氣象局).....	2
表 2	台東縱谷帶北區活斷層特性(摘自石再添等，1983).....	11
表 3	米崙台地前人研究之定年資料.....	40
表 4	1b 槽溝標本年代資訊.....	79
表 5	1a 槽溝標本年代資訊.....	81
表 6	2 號槽溝標本定年資訊.....	95
表 7	古地震事件之時間間隔.....	115

第一章 緒論

1-1 前言

台灣東部花東縱谷地區位於歐亞板塊與菲律賓海板塊之板塊縫合帶(圖 1)，地體構造相當複雜，菲律賓海板塊以每年約 8.2 公分的速率持續向歐亞板塊聚合(Yu et al., 1997)，因此構造活動頻繁並伴隨著許多地震的發生，常造成房屋損害及人民傷亡。歐亞板塊向東與菲律賓海板塊聚合，形成台灣本島的中央山脈以及西部麓山帶地區，然而在台灣東北方菲律賓海板塊則隱沒至歐亞板塊之下，形成琉球海溝。花東縱谷地區位於中央山脈與海岸山脈間，而一系列的縱谷活動斷層即為板塊縫合帶。

由於上述複雜的地體構造背景，台灣地震多數集中在東部外海地區，且部分地震之震源深度較淺，常對於近海地區造成影響，近百年內東部地區已發生數次災害地震，並造成嚴重的房屋破壞與人民傷亡，其中數起地震皆發生於花東縱谷北端之花蓮市外海區域，包含 1951 年的花東縱谷地震序列、1986 年、1990 年及 2018 年的花蓮地震。1951 年 10 月 22 日規模 7.3 地震(Cheng et al., 1997)及 2018 年 2 月 6 日規模 6.4 地震(Lee et al., 2019)，兩起地震共通點在於皆使米崙斷層之斷層跡沿線出現地表破裂及噴砂等災情，1986 年 11 月 15 日規模 6.8 地震及 1990 年 12 月 13 日規模 6.5 地震則造成人口傷亡及房屋倒塌毀損(表 1)。

2018 年 2 月 6 日深夜 11 點 50 分在台灣東部花蓮外海發生芮氏規模 6.2 的地震，震央位於花蓮縣政府東北方 16.5 公里，震源深度為 6.3 公里(圖 2)，此地震之發生與琉球海溝隱沒系統的發震構造相關，並引起米崙斷層及嶺頂斷層北段沿線出現地表破裂，此地震更對花蓮市區帶來嚴重破壞，包含數棟房屋倒塌、人民傷亡與結構破壞，許多地方出現噴砂的現象。此次災害性地震說明地震災害評估對於災害地震頻繁的台灣來說相當重要，而活動斷

層的活動特性、地震發生的週期及機率皆能提供地震災害評估有效的資訊。

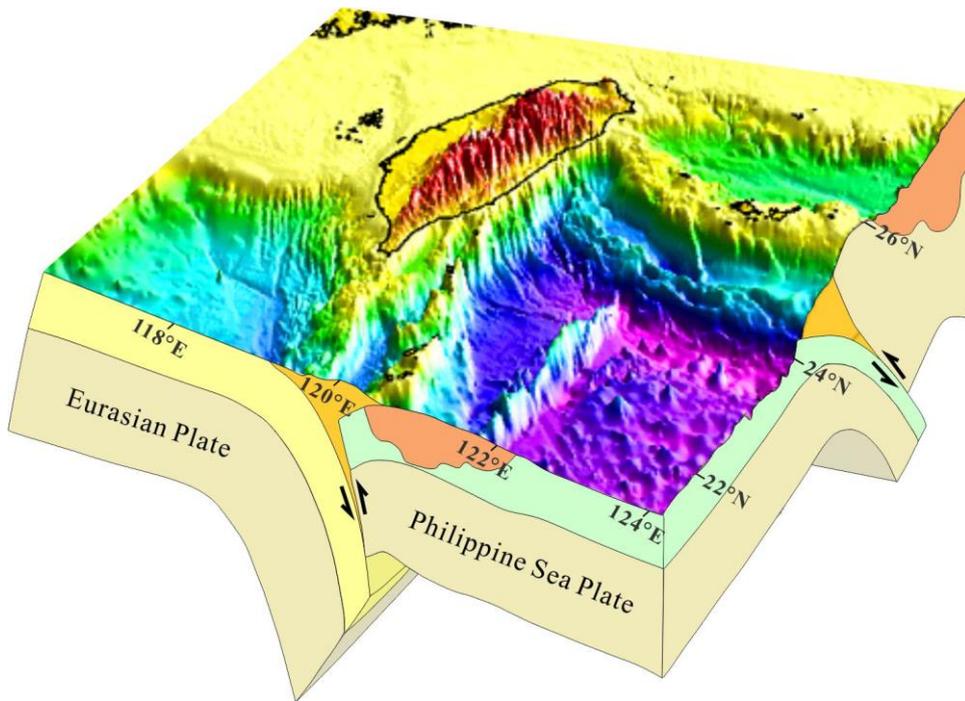


圖 1 台灣地體構造立體示意圖。台灣地處歐亞板塊(Eurasian Plate)及菲律賓海板塊(Philippine Sea Plate)交界。

表 1 花蓮市外海區域之災害地震列表(摘自中央氣象局)

	日期	經度	緯度	位置	震源深度	規模	死亡人數	房屋全毀
1	1951.10.22	23.9	121.7	花蓮東南東 15 公里	4	7.3	68	-
2	1986.11.15	24.0	121.8	花蓮東偏南 10 公里	15	6.8	13	37
3	1990.12.13	23.9	121.5	花蓮南方 10 公里	3	6.5	2	3
4	2018.02.06	24.1	121.7	花蓮縣政府東北方 16.5 公里	6.3	6.2	17	4

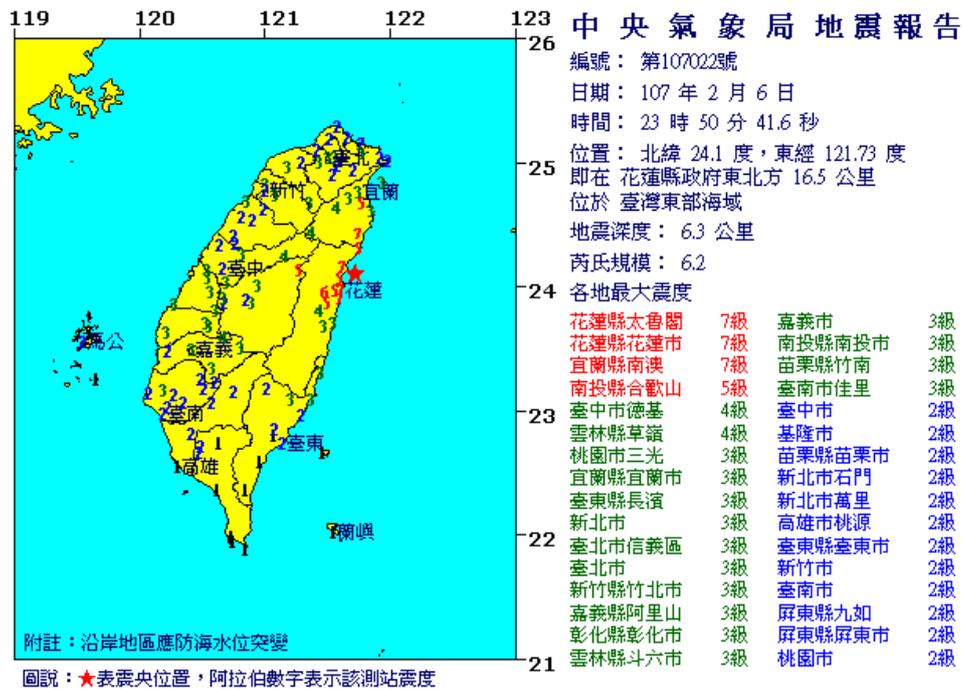


圖 2 中央氣象局 2018 年 2 月 6 日花蓮地震報告圖(摘自中央氣象局)。

1-2 研究動機與目的

米崙斷層過去未有露頭位置的報導，缺乏此斷層相關的直接資料，僅地形上有明顯的線狀崖，然而百年來兩次的災害性地震致使米崙斷層跡沿線出現地表破裂，足以說明米崙斷層為一條致災型活動斷層，因此米崙斷層之活動性及地震再現週期與機率對於地震災害防治將扮演相當重要的一環，對於未來的地震災害評估能提供重要的資訊，而古地震研究為相當重要且直接的方法，透過解析地底下斷層曾經活動過的紀錄，推測斷層的活動性及地震再現週期。本研究將藉由解析槽溝內沉積層與構造間的截切關係，與地質鑽井之岩性對比，推測槽溝中記錄到的米崙斷層古地震事件，並藉此推估米崙斷層的地震再現週期以及垂直錯移速率。

第二章 研究區域概述

2-1 地體構造

台灣東部地區為菲律賓海板塊及歐亞板塊之板塊交界帶，地體構造複雜，因此在東部海域有許多島弧與海溝的產生。本研究區域主要位於花東縱谷最北端，主要關注的活動斷層為米崙斷層，此區域位於複雜的地體構造位置，故陸域及海域的地形也較多變。

呂宋火山島弧隨著菲律賓海板塊移動與歐亞板塊碰撞，並在花東縱谷地區形成一系列的縱谷斷層系統，而米崙斷層外海海域的地體構造相當複雜，東側為菲律賓海板塊隱沒至歐亞板塊形成的琉球海溝延伸至此，南方則為歐亞板塊與菲律賓海板塊碰撞形成的呂宋島弧最北端(圖 3)。因此本研究區域位於海岸山脈北端與琉球隱沒系統的交會處，此區域於陸域上最主要的活動斷層即為米崙斷層，過去的歷史地震足以說明其活動所能造成災害之嚴重性。

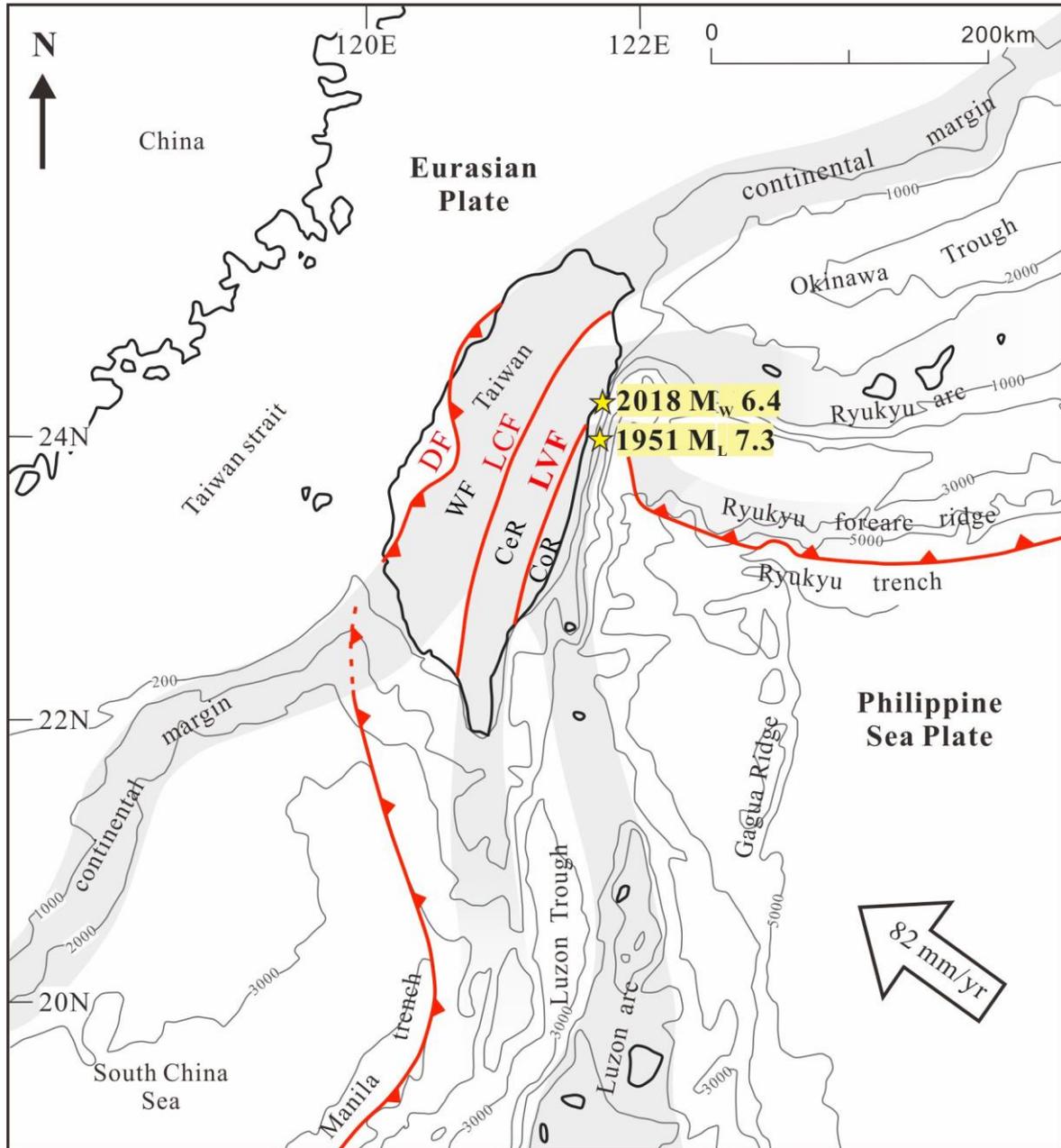


圖 3 台灣周圍地體構造圖(修改自 Shyu et al., 2005)。LVF：縱谷斷層；LCF：梨山-潮州斷層；DF：變形前緣；CoR：海岸山脈；CeR：中央山脈；WF：西部麓山帶。黃色星號標示為 1951.10.22 規模 7.3 的縱谷地震與 2018.02.06 規模 6.4 的花蓮地震之震央位置。

2-2 區域地質概況

本節將針對米崙斷層的區域地形、地質及構造進行介紹。以米崙斷層跡為劃分，位於上盤的米崙台地主要出露更新世地層，下盤的北埔平原及花蓮平原則為全新世沖積層。而在米崙台地上除了米崙斷層外，過去的文獻也指出尚其他的橫移斷層位於米崙台地上，以及陸地上的米崙斷層向北延伸至海域上的延伸性。

2-2-1 地形

地形方面可以分成陸域及海域兩部分做探討，陸域方面，東部縱谷最北端大致以沖積平原與米崙台地為主，平原西側為高聳的中央山脈，外海部分則有花蓮海脊、花蓮海峽及新城海脊位於附近。

陸域部分，參考劉平妹等(2007)以及現今通用名稱，縱谷北端區域大致可以分成北埔平原、花蓮平原及米崙台地三部分(圖 4)。北埔平原指花蓮北埔地區，位於米崙台地西北側，是平原區的最北邊。位於米崙台地西側的花蓮平原則是指美崙河流域的平原地區。米崙台地最早由林朝榮(1957)開始對其做詳細的地形研究，並將米崙台地分成六個部分：北米崙傾動地塊、砲台山砂丘、古米崙湖、民本里砂丘、南部米崙台地及花崗山台地。之後，石再添等(1983)與楊貴三(1986)將米崙台地分為三階(FT1、FT2 與 FT3)。而鍾令和(2004)以台灣 40 米的數值地形模型進行地形分析，將米崙台地分為三個區塊：北米崙傾動地塊、古米崙流域與南米崙階地群(圖 5)，並利用坡度與高程差分析可將南米崙階地群再細分成九個階地群，階地群間的高差大約 4-5 米，並認為這九個高度不同的階地群可能暗示九次大地震所造成的抬升結果，並反映出米崙斷層持續抬升的現象。此外，美崙溪的河流方向異常轉彎，可能的解釋為受到米崙斷層活動造成下游區域抬升，使七星潭形成斷

層池，並改成由美崙山南邊向東出海。

石再添等(1983)根據地形上的線形崖判釋出米崙台地上可能存在的四條構造線，包含北埔斷層、美崙斷層(即米崙斷層)、民意斷層及七星潭斷層(圖 6、表 1)，除了美崙斷層有出現直線狀急崖跟斷層池，其他皆僅有斷層小崖出現。

海域的部分，花蓮海脊一般被認為是米崙台地的延伸，其走向呈東北-西南向，花蓮海脊兩側坡度陡峭，但中間平坦部分水深相當淺，且形貌呈階地狀。而新城海脊位於花蓮海脊東北側，兩者之間則是花蓮峽谷，花蓮峽谷向南延伸的部分則是位於海岸山脈與耶雅瑪海脊之間(林廉凱，2017)。

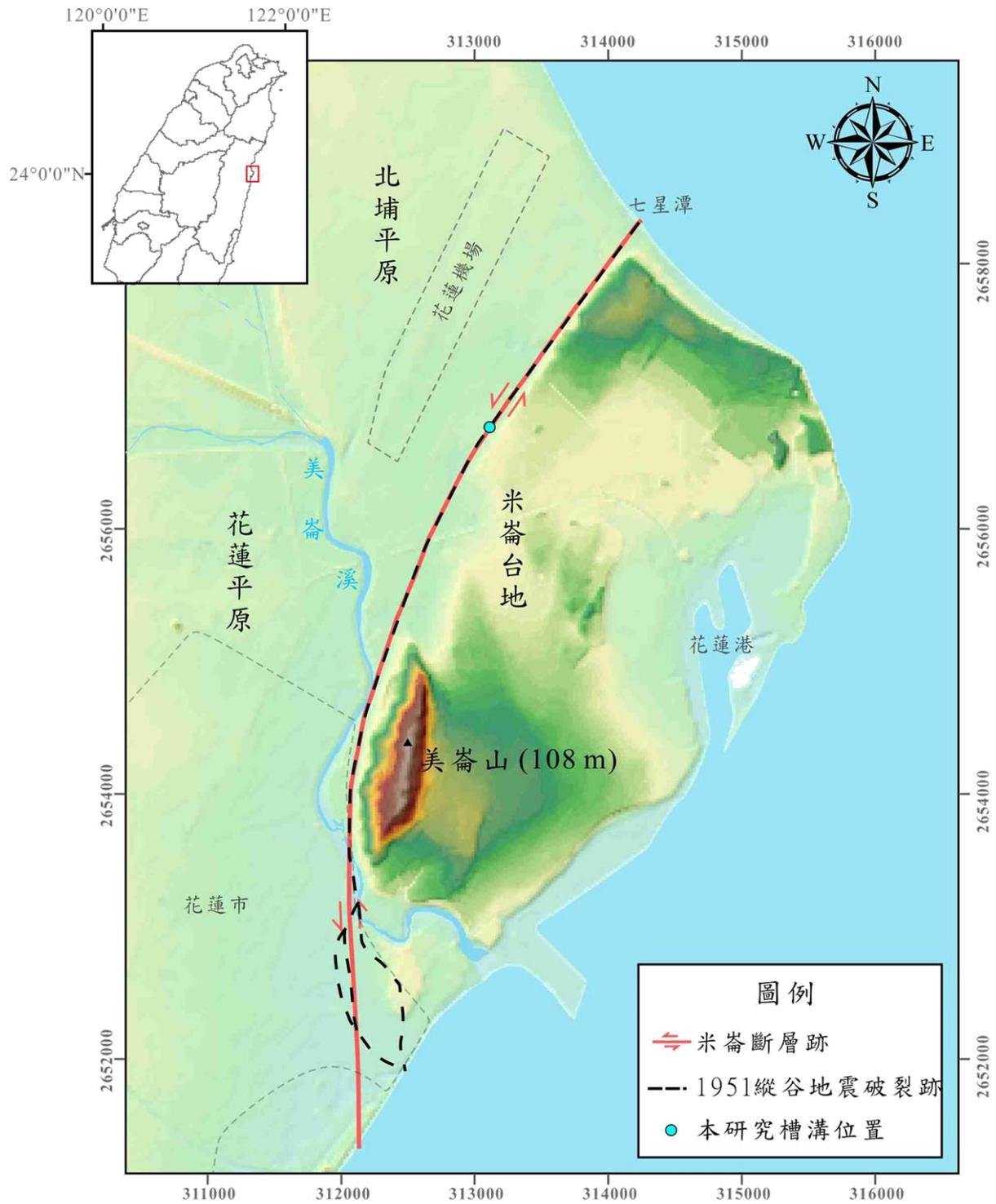


圖 4 縱谷北端花蓮地區陸域 20 米數值模擬地形圖。此區域可分成北埔平原、花蓮平原及米崙台地，最高點為美崙山(108 米)。藍點為本研究槽溝位置，斷層跡與 1951 地震破裂跡則參考林啟文等(2009)。

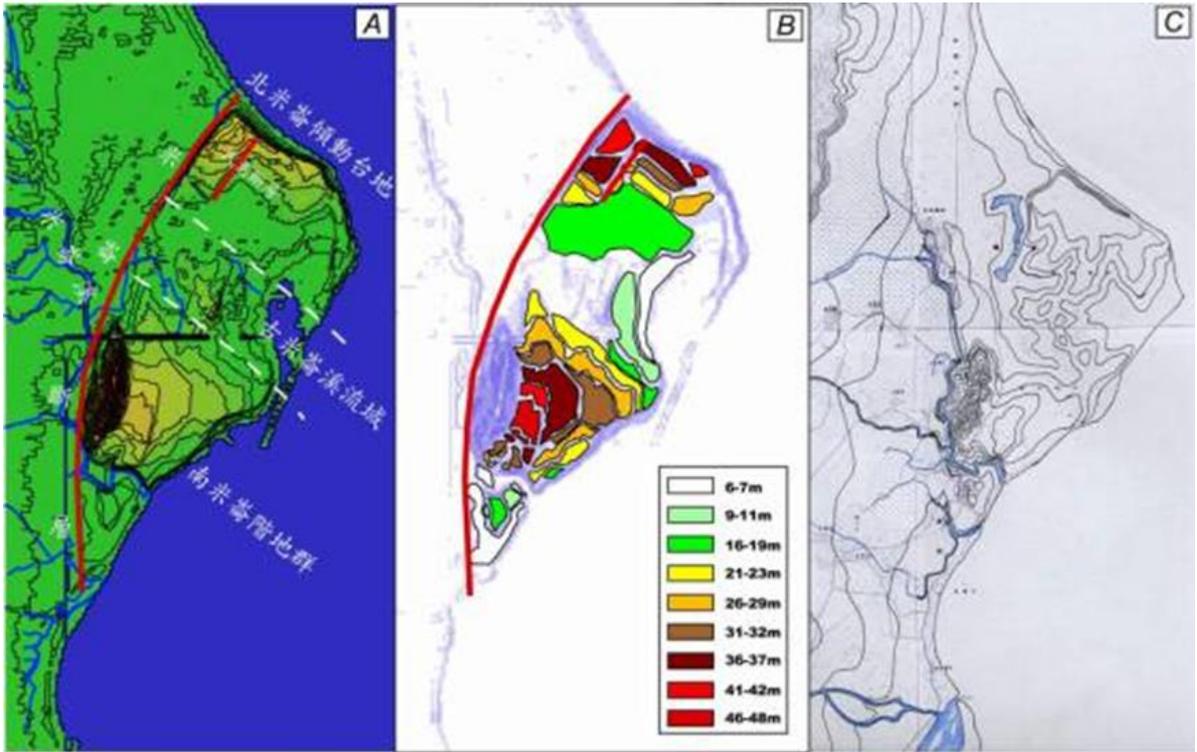


圖 5 花蓮地區各類地形圖(摘自鍾令和，2004)。A.花蓮地區數值模型地形圖 B.米崙台地上階地分布圖 C.花蓮地區最早的地形圖。

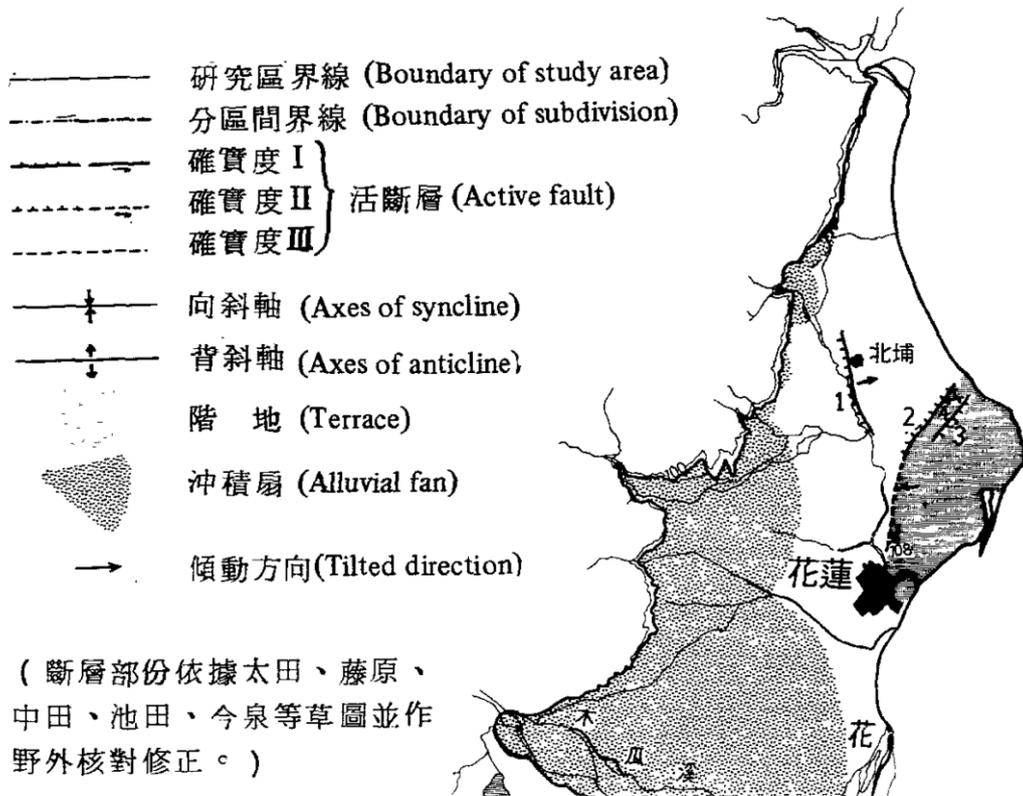


圖 6 花蓮地區的活動層分佈(摘自石再添等，1983)。編號 1：北埔斷層；編號 2：美崙斷層；編號 3：民意斷層；編號 4：七星潭斷層。

表 2 台東縱谷帶北區活斷層特性(摘自石再添等, 1983)

1. 斷層編號	2. 斷層名	3. 圖幅編號	4. 確實度	5. 活動度	6. 長度 km	7. 走向	8. 傾斜	9. 斷層形態	10. 變位基準	11. 年 代 10 ⁴ 年	12. 斷層變位		13. 平均變位速度 m/10 ³ 年	14. 備註、文獻 62:表示文後所列第62號文獻
											縱移成分 隆起側 m	橫移成分 m		
①	北埔斷層	9721 III	I		2.3	NNW		斷層小崖 北埔平原面			E (3-6)			
②	美崙斷層*	9721 III	I		4.4	NE	E	直線狀急崖 斷層池**	美崙台地 北埔平原面		E (5-20)	L		*1951年花蓮地震, 東側上升1.2m, 西側的F ₁ , 54的43**
③	民意斷層	9721 III	I		1.6	NE		斷層小崖	美崙台地		W (10)			
④	七星潭斷層	9721 III	I		0.4	EW		斷層小崖	美崙台地		N (8)			
⑤	賀田山斷層	9720 IV	III		1.8	NNE		傾斜不連續 地層直立*	山地斜面 都樓山層		E (10±)			* N40°E, 40°-80° SE
⑥	月眉斷層	9720 IV	I		2.3	NNE		三角切面, 閉塞丘 斷錯河	山地斜面 小溪		E (10-50)	L(50-100)		
⑦	大坪斷層	9720 IV	I		4.4	NNE		斷層鞍部 分離丘陵	山地斜面 山地斜面		W(3-15)	L		
⑧	米棧斷層	9720 IV	III		3.6	NE		遙急點 分離丘陵 河階面逆傾斜	山地斜面 山地斜面 低位河階		W(3-15)			
⑨	山興斷層*	9720 IV	I		6.9	NNE	E	直線狀鞍部 三角切面 斷錯河 斷層帶露頭**	山地斜面 山地斜面 小溪 都樓山層		E (20-40)	L(50)		*92的F ₄ **N5°E, 20° SE
⑩	東富斷層	9620 II	III		1.1	NS		鞍部 斷層谷	山地斜面 山地斜面		W (10)			
⑪	光復斷層	9620 II	III		1.0	NE		斷層小崖 直線狀崖	馬太鞍溪沖積扇 馬太鞍溪沖積扇		E (10-15)			

註: 本表格形式參考「日本的活斷層」一書, 分14項紀錄, 關於5. 8. 11. 13等項空白部份有待研究補充。1. Fault number 2. Name of fault
3. Sheet number 4. Certainty as active fault 5. Degree of fault activity 6. Fault length 7. Strike 8. Dip 9. Fault trace features
10. Fault reference 11. Age of fault reference 12. Fault displacement 13. Average slip rate 14. References

2-2-2 地層

本區出露的地層由老至新為：米崙鼻礫岩、米崙山礫岩、米崙層、花蓮層、階地堆積層與沖積層(圖 7)，以下將分別說明：

米崙鼻礫岩：本層僅出露於七星潭海岸，主要為變質礫岩，礫石大小約 10-20 公分，出露的厚度約 300 米，岩層向南緩傾斜。謝孟龍和鄧屬予(1994)分析北米崙台地上七星潭村至米崙鼻燈塔間之米崙鼻礫岩的岩相及沉積環境，將其以三種岩相區分，分別為顆粒支持的礫層、互層的砂、礫層及平行或低角度交錯層砂層，古水流方向大致指向北或東，並判斷沉積環境為一扇洲的沉積，此套礫岩在經過陸地上的搬運後即入海形成扇洲的沉積，並未經過寬廣的三角洲平原。

米崙山礫岩：由淘選度差的礫石與砂層組成，層面位態為 N20°W/10°W，分佈於米崙山，米崙山礫岩並未與米崙鼻礫岩有直接的接觸關係，但依據岩層傾斜方向，判定米崙鼻礫岩較米崙山礫岩早形成。

米崙層：分佈於北米崙傾動台地與南米崙階地群的頂層，年代為更新世晚期(Chi et al., 1983)，由下至上可以分成巨礫段、珊瑚礁段、有孔蟲段、小礫段與含礫砂土段，厚度約 10 至 30 米。

花蓮層：可分為黑色含砂泥段及砲台山砂丘段，前者為古米崙湖的湖相沉積物或古米崙溪的沖積層，厚度約數公尺，後者則是米崙台地上最年輕的沉積物，厚度可達 20 米，形成原因可能是米崙斷層活動造成台地的抬升，使得海岸線附近的沙丘殘留於米崙台地上。

階地堆積層與沖積層：階地主要以河道礫石的堆積為主，沖積層則為全新世以來於平原上堆積的砂層與泥層。

2-2-3 地質構造

花蓮地區除米崙斷層外，尚有根據線形崖判釋的北埔斷層、民意斷層與南濱斷層，以下將針對米崙斷層與其他三條斷層分別簡述。

米崙斷層為左移斷層兼具逆移分量，呈南北走向，由七星潭海岸延伸至美崙山西南側，陸地上長度約 8 公里，斷層上盤的米崙台地主要以更新世地層為主，下盤則為全新世沖積層(圖 7)。米崙斷層過去由於缺少野外斷層露頭，斷層跡的判定是依據米崙台地沿線的線形崖以及 1951 年地震所造成的破裂跡分佈來劃定，缺乏斷層面的位態等資訊。

而關於米崙斷層的地下構造形貌，張舜傑(1994)由淺層震測結果判釋出米崙斷層兩側於七星潭的層位落差約 170 米，米崙台地中段約 80 米，南段則減少至 60 米。廖宏祥(2006)亦使用淺層震測調查米崙斷層，顯示米崙斷層走向為北偏東 35° ，傾角約 $60-70^\circ$ 並且向東傾，且從震測結果可看出上下盤岩性明顯不同(圖 8)。

斷層的長度與可能致震的規模大小也有相關性，因此米崙斷層向北延伸至海的延伸性也是許多研究探討的方面之一。何邦碩(1974)最早使用水深與多頻道震測探勘花蓮近海海域，認為米崙斷層出海後向東北方延伸。Shyu et al. (2005)根據海底地形數值模型，發現有一近海海脊從米崙台地往東北延伸約 10 公里，故認為米崙斷層延伸至外海後同樣持續向東北延伸(圖 9)。陳俊甫(2013)及 Shyu et al. (2016)利用地震資料探討縱谷北端的地下構造分布，發現米崙斷層延伸至外海區域將轉為東西走向並向南傾斜的逆衝構造，形成弧形斷層系統(圖 10)，使得米崙台地整體抬升。而米崙台地西側的中央山脈山區同樣也可能存在向東傾的逆衝構造，並在立霧溪沖積扇轉為向南傾的逆衝構造，形成弧形的逆衝構造系統，並且提出縱谷北端的地下構造模型(圖 11)。

除了米崙斷層之外，過去有其他研究指出米崙台地上亦有其他的構造存在。石再添等(1983)根據地形上的線形崖判釋出米崙台地上可能存在的四條構造線。林明聖與蕭謙麗(1998)以地形與地質調查方式，並配合地球物理資料，發現米崙台地的活動斷層分布為一倒寫的「爪」字，斷層由台地南端往北分成數條斷層，包括北埔斷層、米崙斷層、民意斷層與南濱斷層，均為左移與逆移分量皆兼具的斷層，而這些左移斷層之間亦發現正斷層(圖 12)。並且提出米崙台地可能的構造史：在區域構造應力的主壓應力為西北-東南方向之下，台地發育出數條以北北東方向為走向的左移斷層，而最西側的北埔斷層向東傾斜，最東側的南濱斷層則向西傾斜，並形成一開花構造(圖 13)，而橫移斷層間的條狀塊體因向南運動，使得南端的地塊因擠壓形成美崙山與花崗山，北端則因拉張而出現正斷層並陷落。



圖 7 米崙台地區域地質圖(修改自林啟文等, 2009)。米崙台地以更新世地層為主, 而本研究槽溝所開挖的位置位於花蓮空軍基地內。

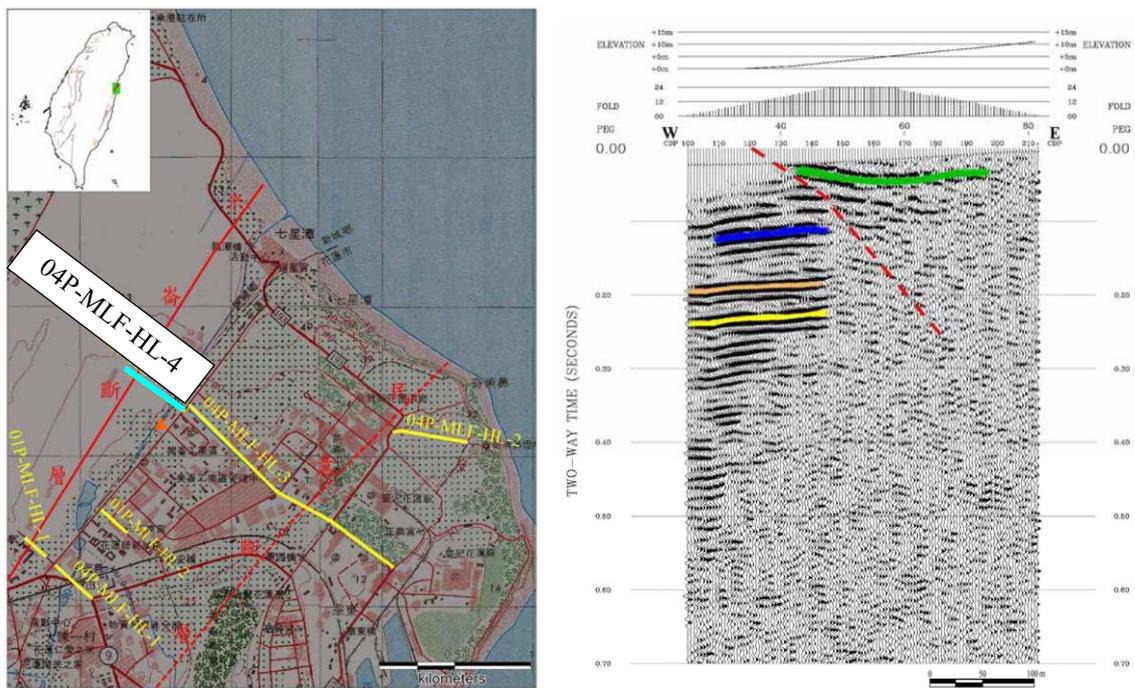


圖 8 震測測線分布圖與測線 04P-MLF-HL-4 之震測解釋剖面(摘自廖宏祥，2006)。左圖為其震測測線佈線位置，右圖為 04P-MLF-HL-4 之震測解釋剖面，此測線有橫跨米崙斷層，從剖面可看到西側為反射訊號良好的沖積層，東側則為無層序之礫岩層。

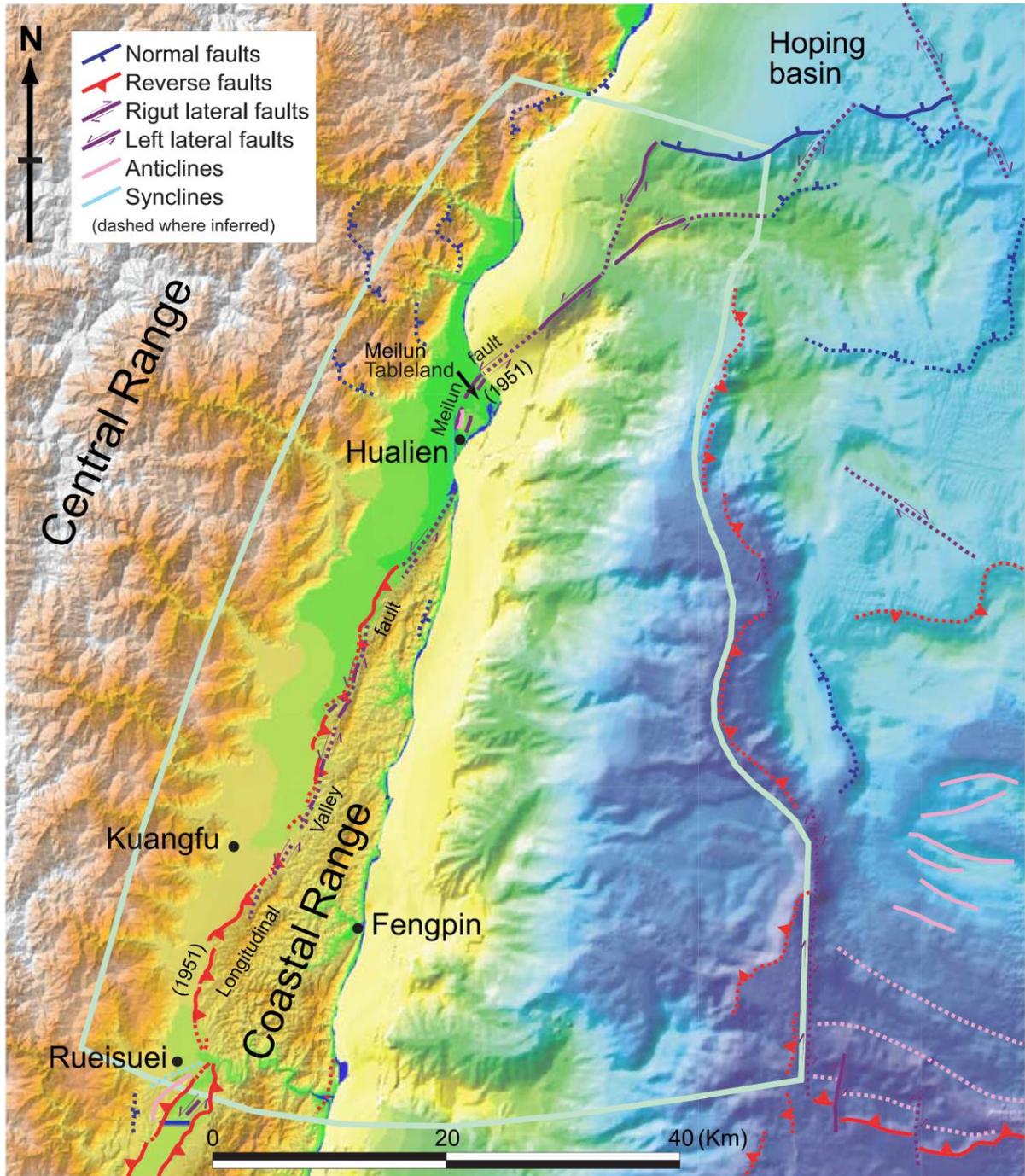


圖 9 東部縱谷北段斷層分佈及海底地形圖(after Shyu et al., 2005)。從地形上觀察到米崙台地可延伸至近海的海脊，故推測米崙斷層往東北延伸約 10 公里。

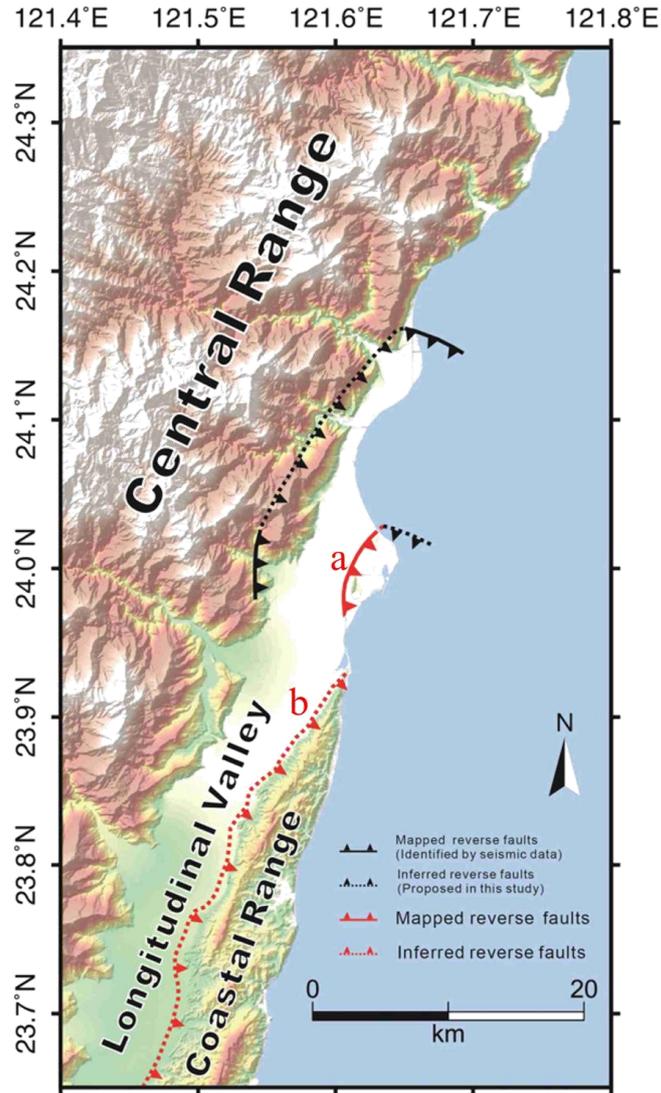


圖 10 縱谷北端區域的構造分布圖(modified from Shyu et al., 2016)。a 為米崙斷層，b 為縱谷系列斷層，米崙斷層延伸至海域後走向可能會轉為近東西向，形成一弧形逆衝系統。

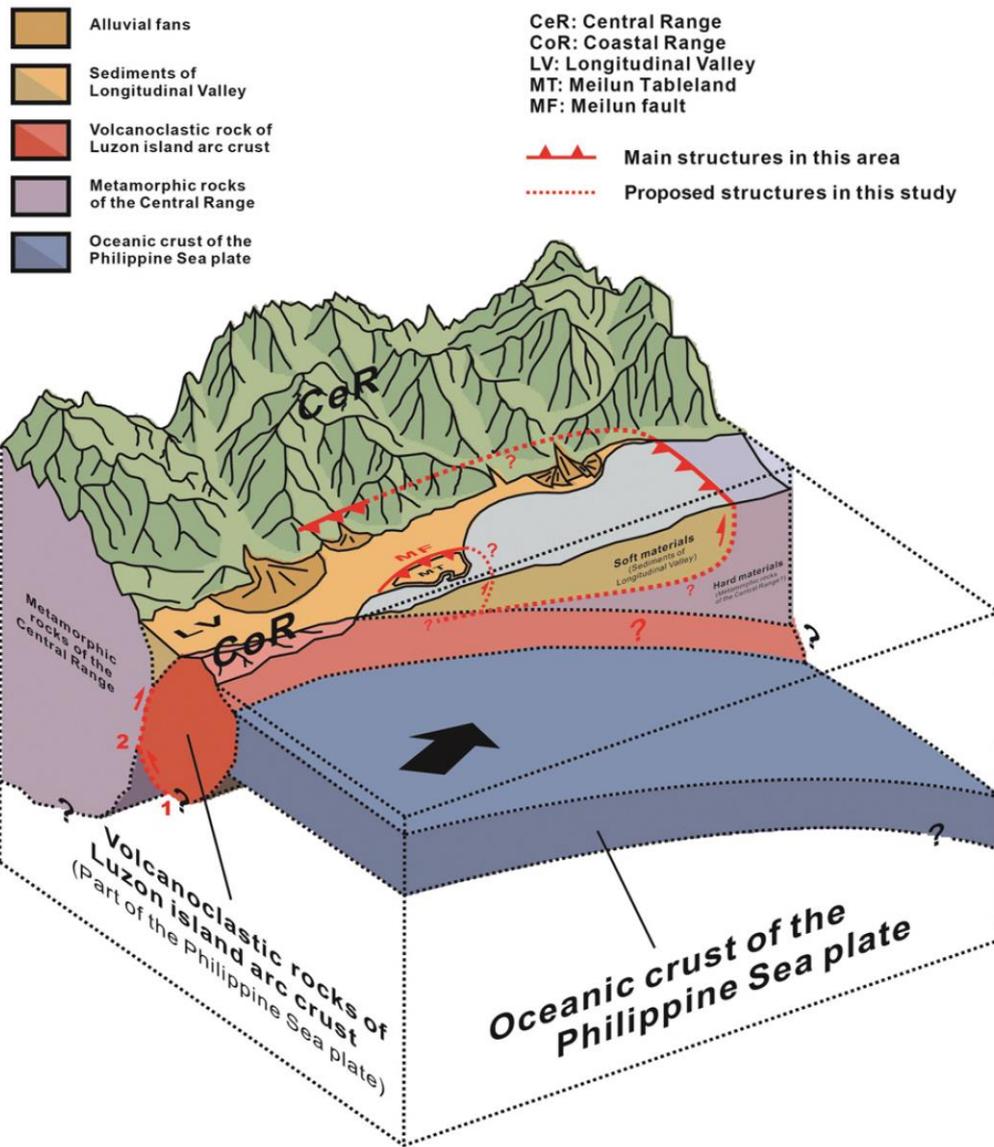
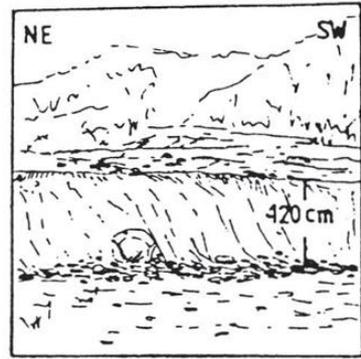
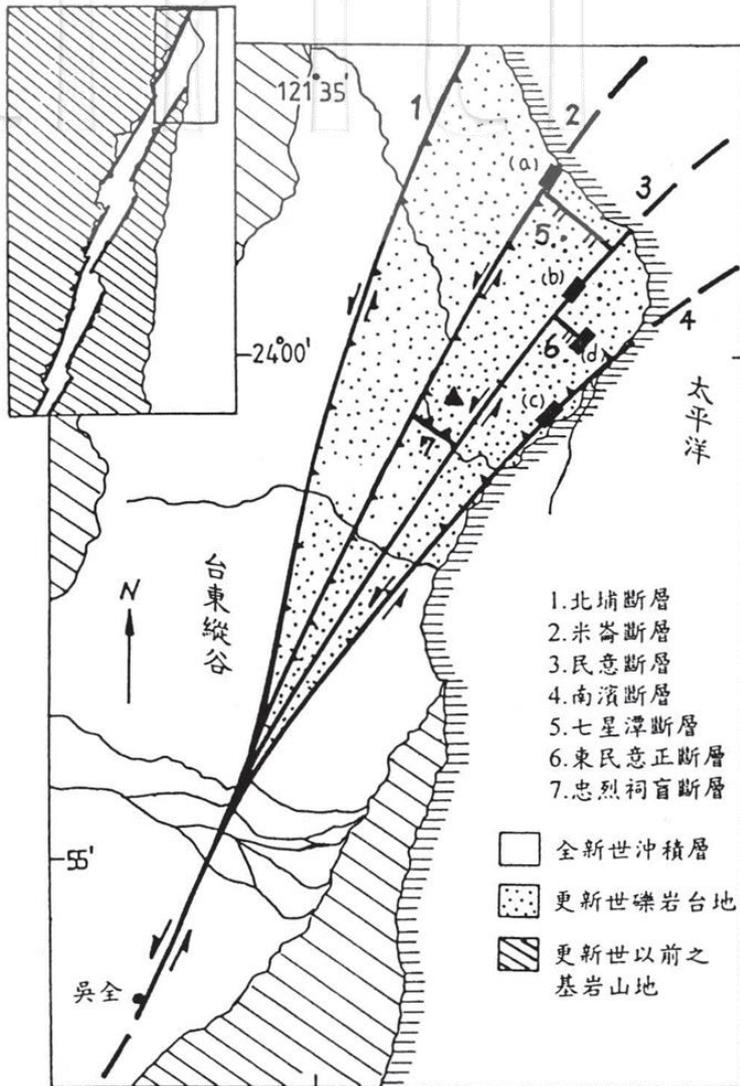
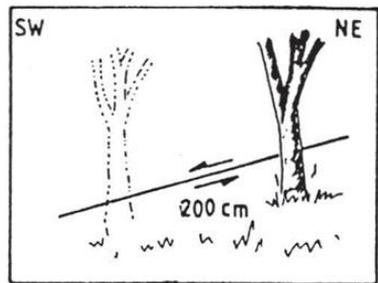


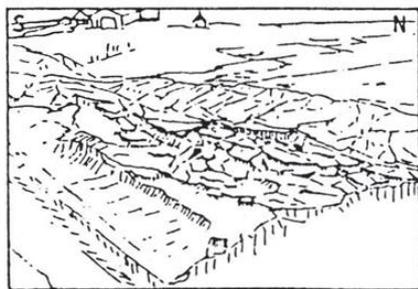
圖 11 縱谷北端地下構造模型(after Shyu et al., 2016)。縱谷北端隨著菲律賓海板塊及海岸山脈向北隱沒至歐亞板塊之下，而淺部的縱谷沉積物向北及向西逆衝至中央山脈基岩之上。



(a) 位於米崙斷層東側的七星山隆起 120 公分。



(b) 民意斷層東側民意里的柚子樹向北移動 200 公分。



(c) 花蓮地震造成南濱斷層活動，使南濱海堤遭受嚴重破壞。



(d) 東民意正斷層南側下降，落差約 1.5 公尺。

圖 12 米崙台地上活動斷層分布圖(摘自林明聖和蕭謙麗，1998)。(a)-(d)為野外調查證據。

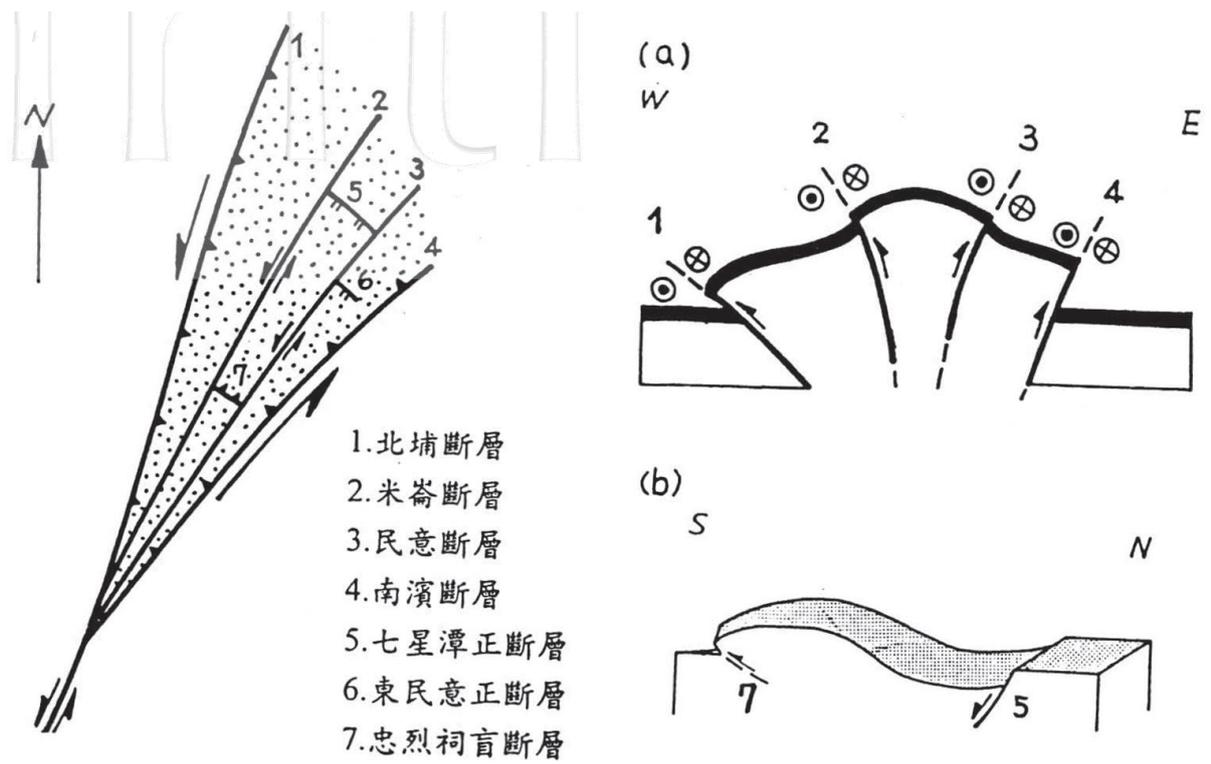


圖 13 米崙台地的橫移斷層模型圖(摘自林明聖和蕭謙麗, 1998)。(a)東西向剖面, 呈現一開花構造(b)南北向剖面。

第三章 前人研究

本章節主要蒐集與米崙斷層古地震研究相關之研究資料，將分成三個部分：2018 花蓮地震相關研究、2018 花蓮地震震前之古地震研究以及米崙斷層的地震再現週期與長期抬升速率。本章節之研究資料將作為本研究槽溝開挖位置之參考，或者將與本研究成果進行討論。

3-1 2018 年 2 月 6 日花蓮地震相關研究

根據中央氣象局的地震報告，2018 年 2 月 6 日深夜 11 點 50 分在東部的花蓮地區發生芮氏規模 6.2 的地震，震央位於花蓮縣政府東北方 16.5 公里，震源深度為 6.3 公里。此次地震除了造成地表出現破裂，也有建築物、道路與橋樑受到嚴重損害、倒塌，包含雲門翠堤大樓與統帥飯店倒塌，以及七星潭大橋的破壞，更造成 17 人罹難與上百人受傷。而上一次同樣造成花蓮地區嚴重災害則是 1951 年 10 月 22 日芮氏規模 7.3 的地震，本章將簡述兩次地震的災害情況與地表變形情況，及 2018 的地震致震原因與同震變形。

3-1-1 花蓮地區同震地表變形

根據經濟部中央地質調查所提供的地震報告，此地震於米崙斷層及嶺頂斷層均有出現地表破裂、噴砂的現象。以下將分成米崙斷層北段(美崙溪以北)、米崙斷層南段(美崙溪以南) (圖 14)及嶺頂斷層三個區段分別介紹。

米崙斷層北段：主要的破裂由七星潭南側海灘延伸至忠烈祠間，破裂長度約 5.5 公里，走向 $N35^{\circ}E$ 往南轉變為 $N12^{\circ}E$ ，而變形量與變形帶寬度有向南逐漸變小趨勢。七星潭海灘上破裂跡走向約 $N50^{\circ}E$ ，東側礫石抬升約 20 公分並具左移分量(圖 15)，七星山北緣為本次地震破裂最大的位置，造成相對抬升約 80 公分與 60 公分之視左移(圖 16)。七星潭以南的區域，包

含華西路、舊花師校區、美崙山西側，出現的破裂皆以左移錯移為主，且錯移量未大於七星潭所見之破裂。次要的破裂由尚志路三號橋往南延伸至忠烈祠下方河堤旁，長約 0.8 公里，主要量測到西側陷落大於 30 公分、左移開裂大於 40 公分的變形量值，與本區出現的噴砂與陷落現象有關，導致變形量值誇大的現象。

米崙斷層南段：破裂跡延伸至花蓮市中心後，地表變形較為分散且不連續，主要沿著水溝或道路等弱面發育，或是穿過房屋、停車場等建物，這些地表變形有的具有左移運動或抬升量、有的是張裂或沉陷造成。

嶺頂斷層北段(圖 17)：同震地表變形從花蓮大橋北側向西南延伸至月眉大橋，長度約 6.2 公里，走向約 $N33^{\circ}E$ ，主要變形皆位於花蓮溪床沙洲上，出現零星的破裂與噴砂現象(圖 18)。

Huang et al. (2019)亦利用 GPS 儀器與無人機等設備於米崙斷層 2018 地表沿線破裂進行詳細的測量與調查(圖 19)，並針對破裂跡的破裂特性進行描繪與解釋，說明主要的地表破裂是以 Riedel shear 模式並以壓力脊或張裂隙相連通(圖 20)，垂直位移量在斷層北段最大約 50 公分並向南逐漸變小，而破裂帶的寬度從斷層北端約 1-20 米，往南逐漸增加至 270 米。

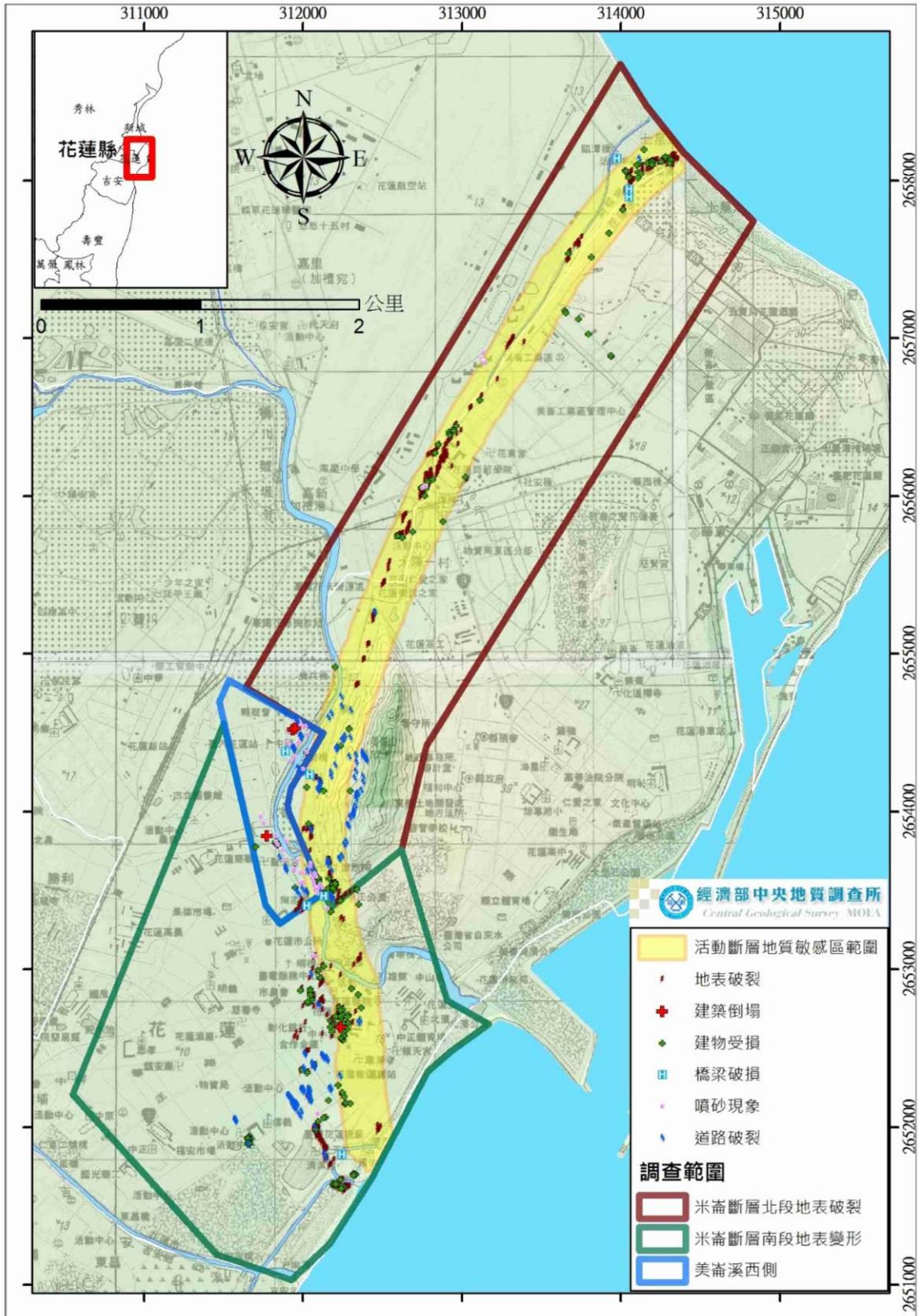


圖 14 米崙斷層地表破裂調查分布圖(摘自中央地質調查所，2018)



圖 15 七星潭南側砂礫灘之地表破裂(摘自中央地質調查所, 2018)。拍攝方向為 S50°W，變形現象顯示東側抬升約 20 公分並兼具左移分量。



圖 16 七星山西側步道之破裂(摘自中央地質調查所, 2018)。照片中可見步道遭左移錯動約 70 公分，向東拍攝。

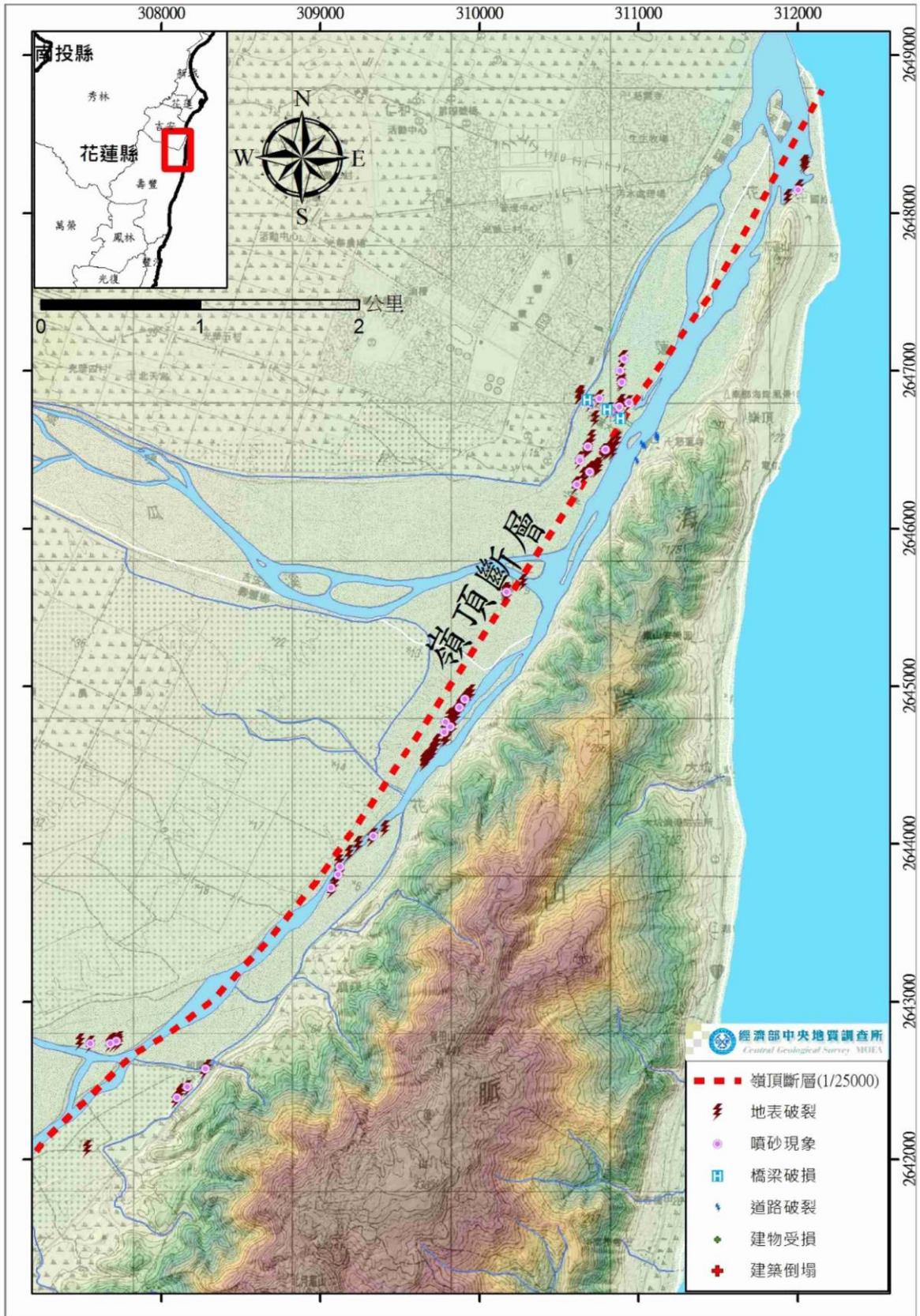


圖 17 嶺頂斷層北段破裂調查分布圖(摘自中央地質調查所，2018)



圖 18 花蓮大橋附近出現的破裂跡與噴砂孔(摘自中央地質調查所, 2018)。
破裂跡與噴砂孔皆近南北走向。

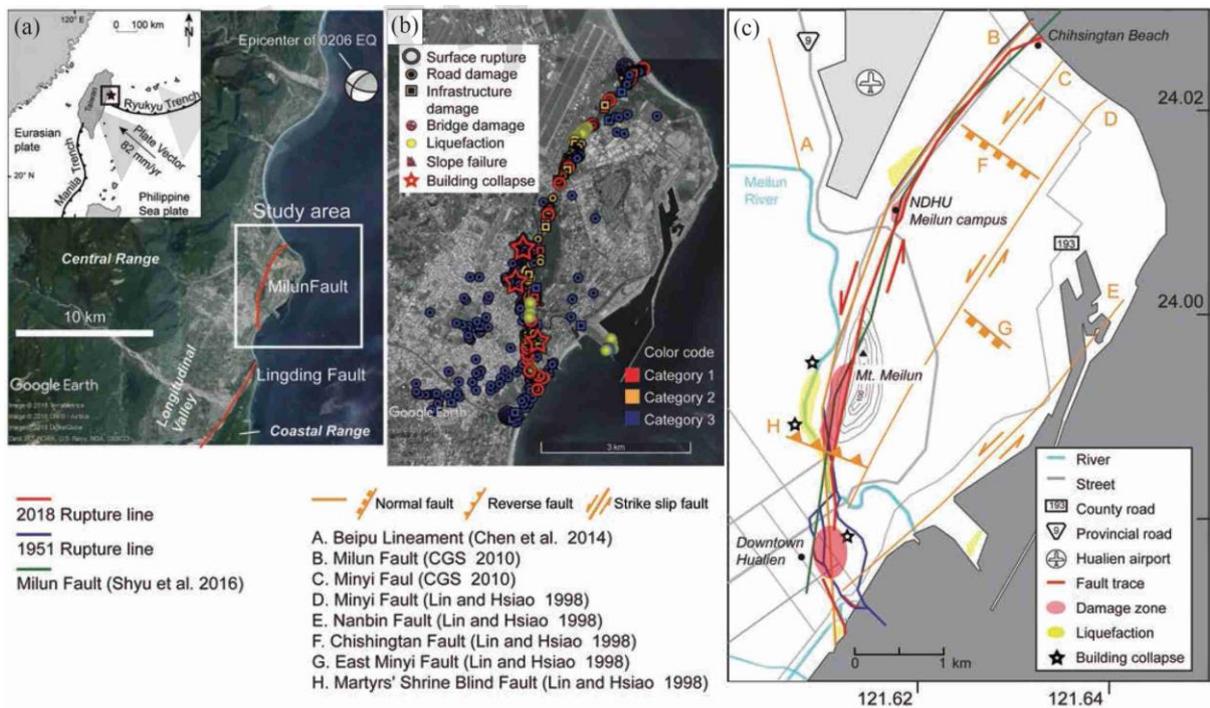


圖 19 2018 花蓮地震災害分布圖(after Huang et al., 2019)。(a)米崙斷層位置與 2018 花蓮地震震源機制解(b)2018 地震造成的破裂與災害分布圖(c)2018 與 1951 地表破裂跡分布圖。

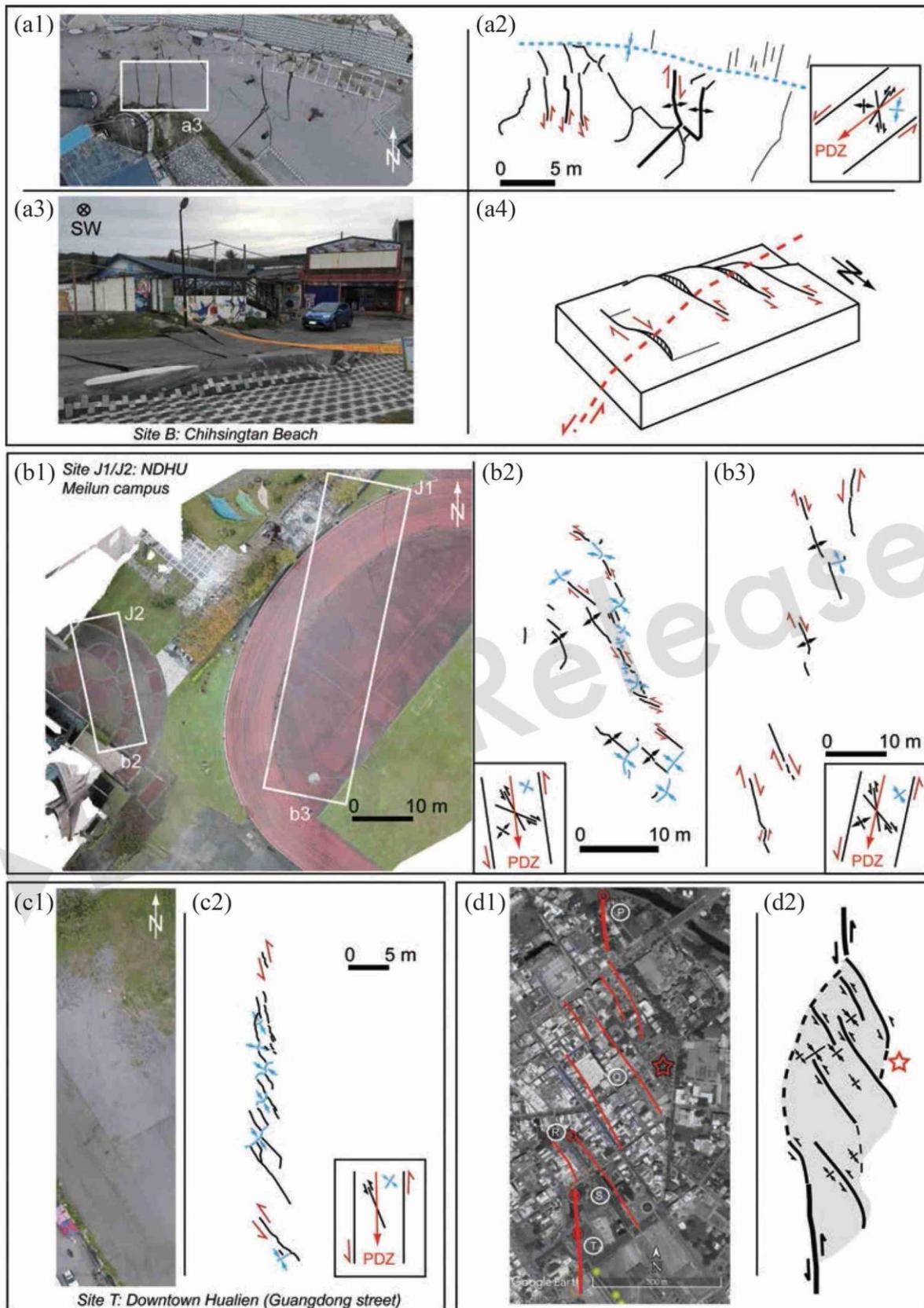


圖 20 破裂帶照片與構造描繪圖(after Huang et al., 2019)。(a)-(d)為四個不同的破裂地區，小框內則說明概念上的應力場狀態。

3-1-2 致震斷層探討及同震變形

2018 年的花蓮地震後陸續有許多地震相關的研究發表，包含此次地震的同震變形情況與導致本次地震之致震斷層的探討，同震變形之探討多以 SAR 衛星影像或 GPS 站的資料為主，並藉由這些資料與斷層幾何形貌的假設，模擬出地震時斷層面上的滑移量並推斷可能的致震斷層。

Yang et al. (2018)利用 InSAR(干涉合成孔徑雷達)變形資料及 GPS 同震位移資料(圖 21)，模擬出 2018 年地震的致震斷層為向西傾的左移斷層，且斷層傾角為 89.4° ，而此斷層的活動觸發了米崙斷層以及一條未知的向西傾之斷層，而模擬結果顯示 InSAR 的資料比 GPS 的位移資料涵蓋更多震後的滑移量(圖 22)。

Lee et al. (2019)則利用聯合震源逆推(Joint Source Inversion)調查花蓮地震的破裂特性，結果顯示由一條南北走向且向西傾的走向滑移斷層最先開始活動，並向南觸發米崙斷層及嶺頂斷層活動(圖 23)，而 1951 年的地震亦可能同樣是孕震構造活動，並觸發米崙斷層的破裂。

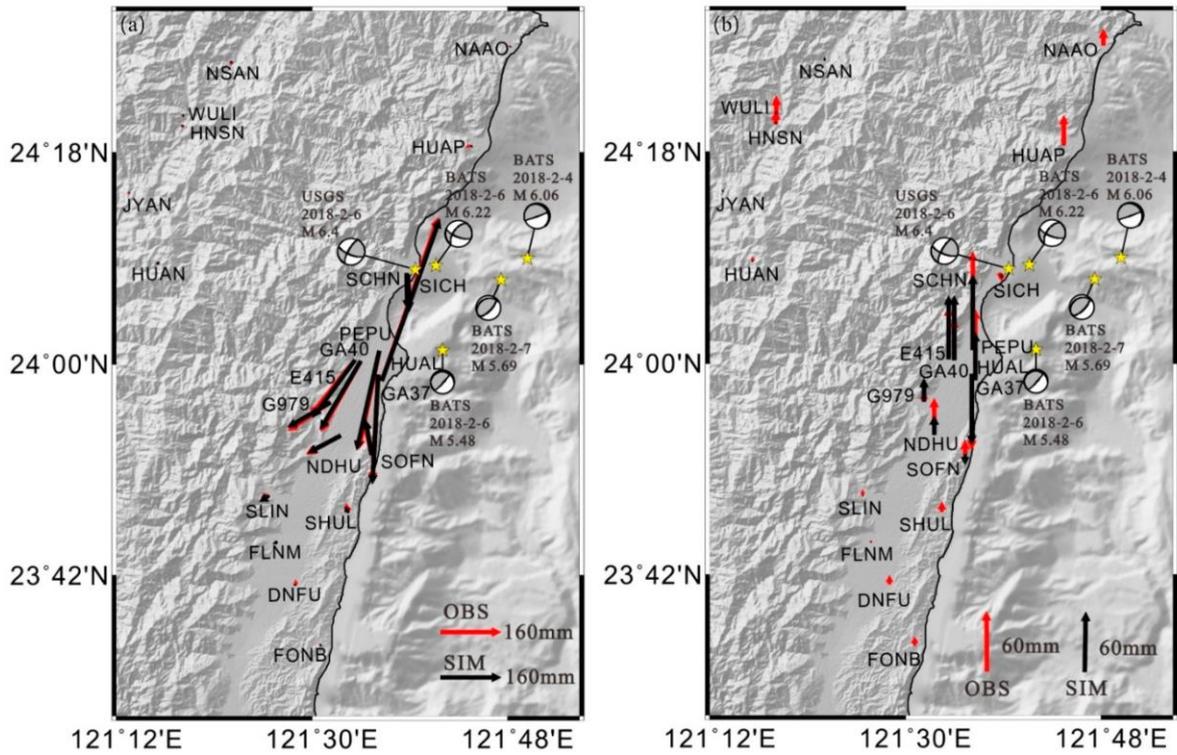


圖 21 2018 花蓮地震之 GPS 同震位移變形(after Yang et al., 2018)。左圖為水平方向之同震變形量，右圖則為垂直方向之同震變形量，海灘球為主震及主要餘震的震源機制解，紅色箭頭為實際位移量，黑色箭頭則是同震模型模擬出的位移量。

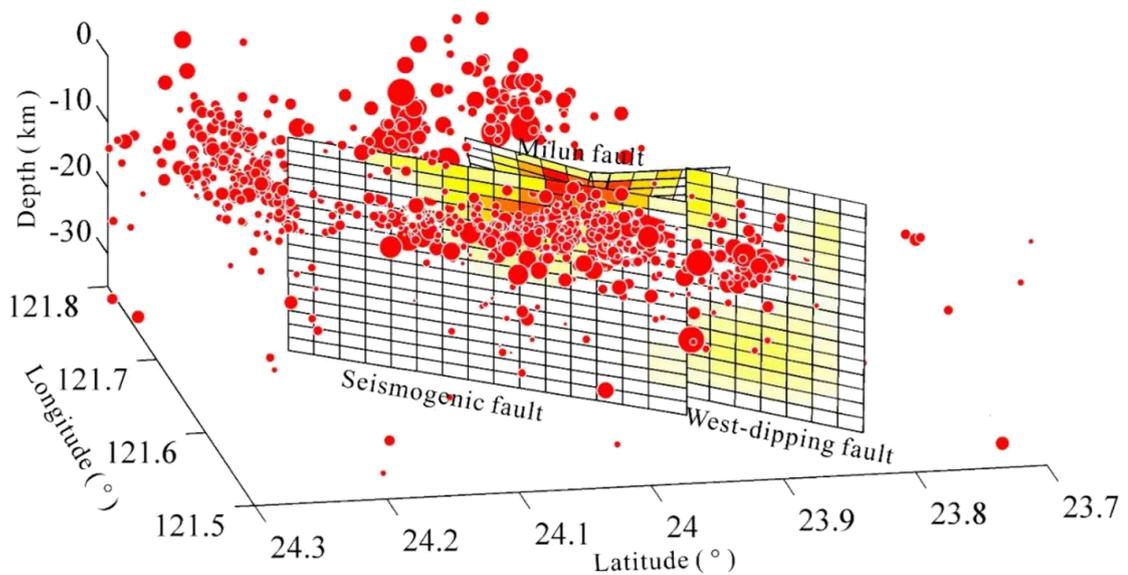


圖 22 2018 花蓮地震同震及震後的斷層模型(after Yang et al., 2018)。此模型由 InSAR 同震變形資料推斷，最大滑移量約 2.1 米。

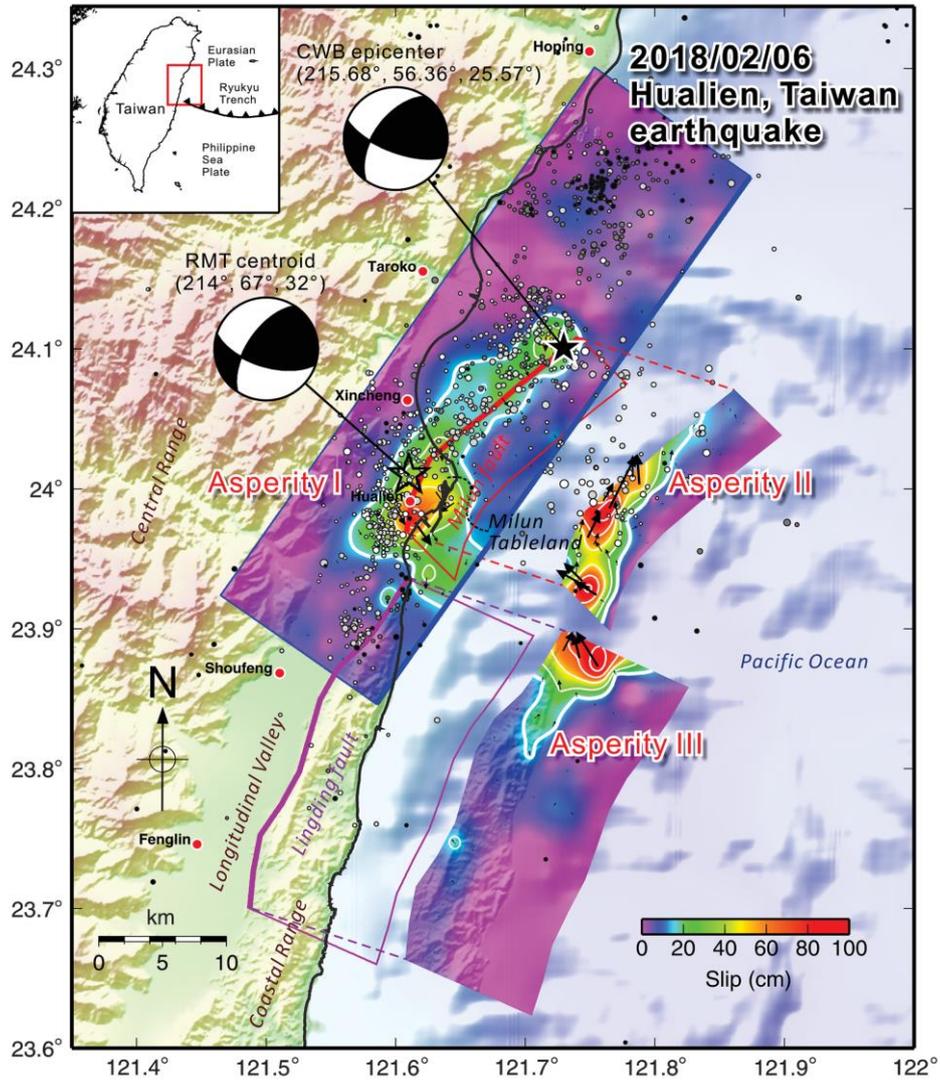


圖 23 聯合震源逆推結果之滑移量分布圖(after Lee et al., 2018)。Asperity I: 南北走向並西傾的致震斷層；Asperity II: 米崙斷層；Asperity III: 嶺頂斷層。黑色星號為 CWB 震央位置，空心星號為 RMT 震央位置，灰色圓形則為震後兩周內的餘震。

3-2 2018 花蓮地震震前之古地震研究

2018 花蓮地震之前，花蓮地區於 1951 年 10 月 22 日發生的縱谷地震也與米崙斷層相關，當天分別於 5 時 34 分及 11 時 30 分發生兩起強震(臺灣省氣象所，1952)，Cheng et al. (1996)將兩次地震重新定位後，分別位於花蓮東方外海及七星潭北部外海，兩起地震造成花蓮地區出現破裂。劉啟清(1988)分析整個米崙台地可能都受到 1951 年地震造成的抬升作用，米崙斷層則是該次地震的地震斷層。以下將簡述 1951 年地震時花蓮地區的破裂情形，以及米崙斷層相關的古地震研究結果。

3-2-1 1951 年地震地表破裂

地震發生後的報章雜誌記錄與歷史文獻皆留下當時地震所造成的地表破裂之記錄。根據臺灣省氣象所(1952)之紀錄，當時花蓮機場東側抬升 50 公分，七星山抬升 120 公分，七星潭東側抬升 40 公分。楊蔭清(1953)進行調查後發現，1951 年地震破裂跡北起七星潭海岸，往南延伸至美崙山下的忠烈祠橋頭後分成三段，最後可能在海岸線附近會合(圖 24)。林朝榮(1962)指出當時地震造成七星潭出現 2 米的視左移，且東側上升 1.2 米。Hsu (1962)則指出當時斷層上盤抬升 50-60 公分，下降側有斷層池。

3-2-2 米崙斷層古地震槽溝研究

陳文山等人(2004; 2012)過去曾開挖兩次槽溝來進行米崙斷層的古地震研究，開挖位置分別於花蓮機場內東側崖邊(2004)與花崗山西側(2012)(圖 25)。2004 年開挖的花蓮機場內槽溝剖面(圖 26、圖 27)，依岩相可分為回填土(O1)、砂土層(S1)、砂土層(S2)、砂層(S3)等四個沉積層，沉積層的位態皆向西傾斜，槽溝東南方露頭的砂層則呈水平(圖 28)，從開挖的剖面及東

南側露頭的地層來看，此崖的構造呈一單斜褶皺構造，而米崙斷層的位置應位於槽溝的西側或下方，現今地形受填土造成崖線東移。

2012 年則在花崗山西側，米崙斷層南段的位置，開挖兩個古地震槽溝及排鑽(圖 29)，從槽溝剖面的地層分析(圖 30、圖 31)，認為 M1 層沉積後地層產生褶皺變形，O 層在二號槽溝北牆的垂直變形量約 300 年以來至少 80 公分，而約 1820-1630 yr BP 以來，至少造成 4 公尺(SG 層)的高差。由槽溝剖面之變形分析，顯示長期以來此崖坡就受到米崙斷層活動的影響，雖然一號槽溝中未見變形(圖 32)，仍推測 1951 年的地表變形帶還是通過此崖坡之下。

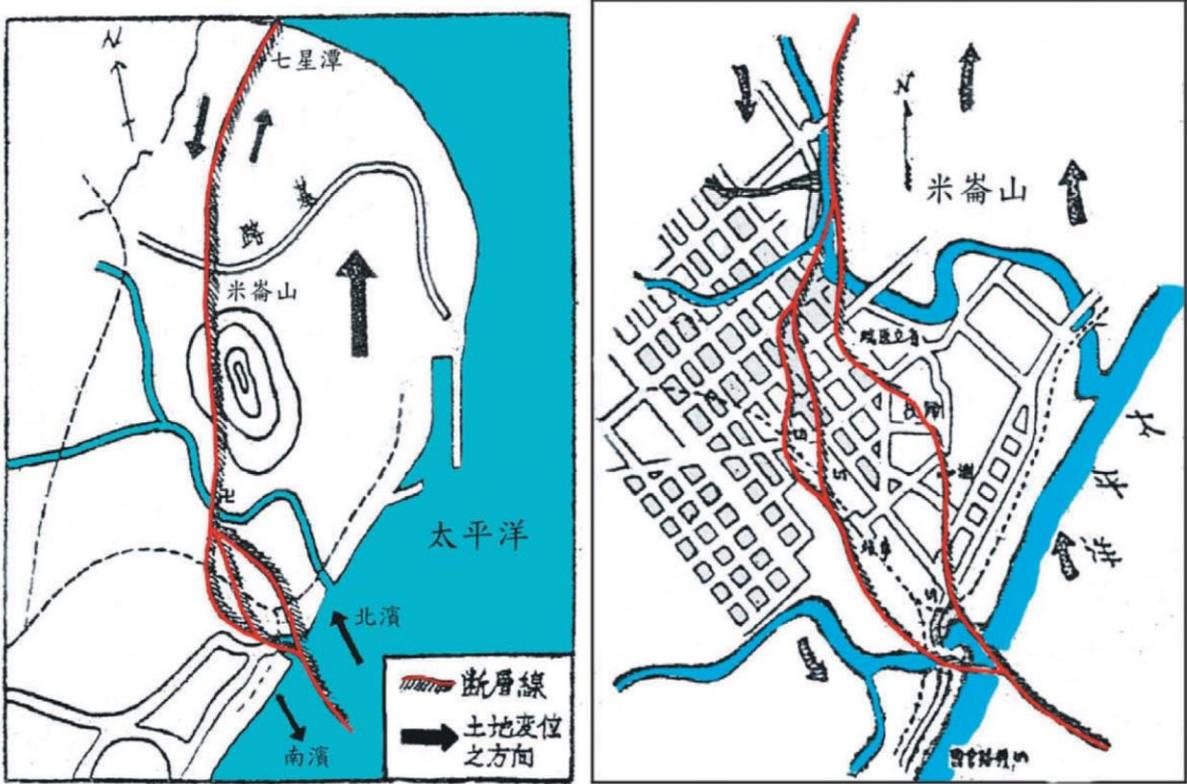


圖 24 1951 年地震於花蓮地區造成之地表破裂跡(摘自朱傲祖和游明聖，1995)。地震當時報紙所報導的破裂分布，右圖為整個花蓮地區地表破裂分布圖，左圖則為地表破裂分岔為三段之放大圖。



圖 25 米崙斷層古地震研究之槽溝位置圖(修改自陳文山等，2012)。圖中包含三個槽溝，分別位於花蓮機場內東側崖邊(陳文山，2004)、花崗山西側(陳文山等，2012)，本研究槽溝則位於空軍基地內。

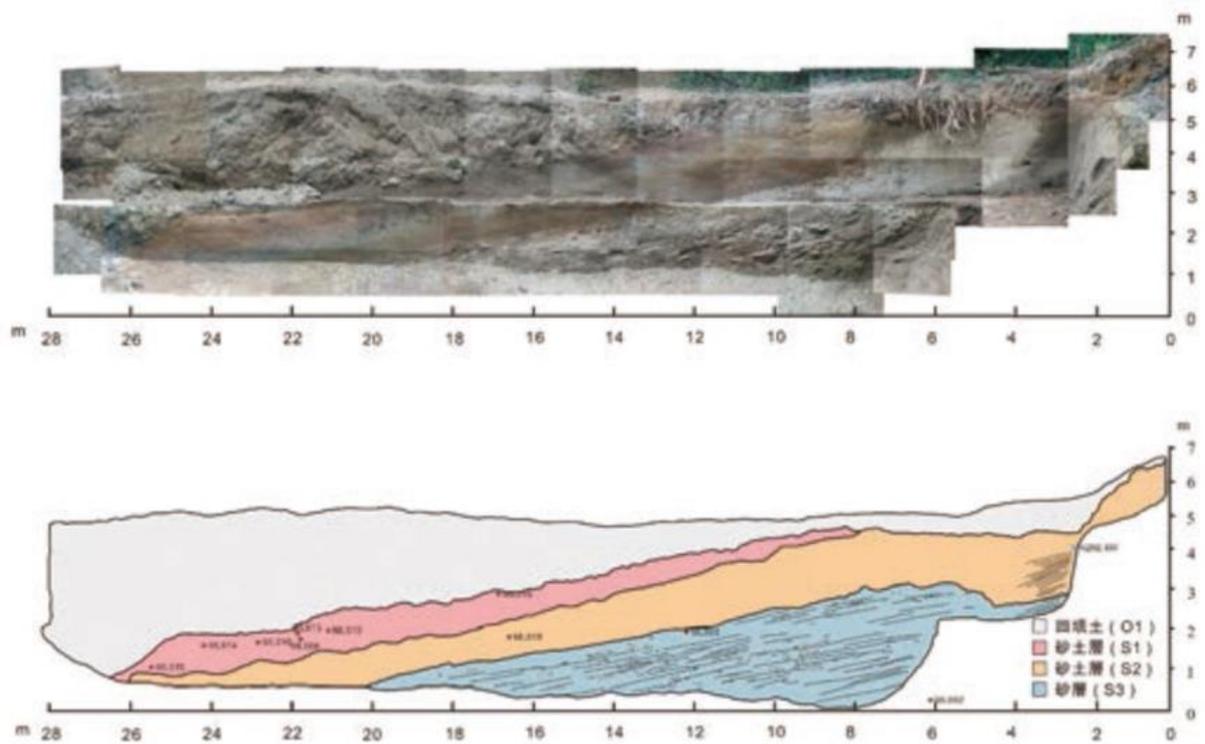


圖 26 花蓮機場內東側崖邊槽溝北牆剖面(摘自陳文山，2004)

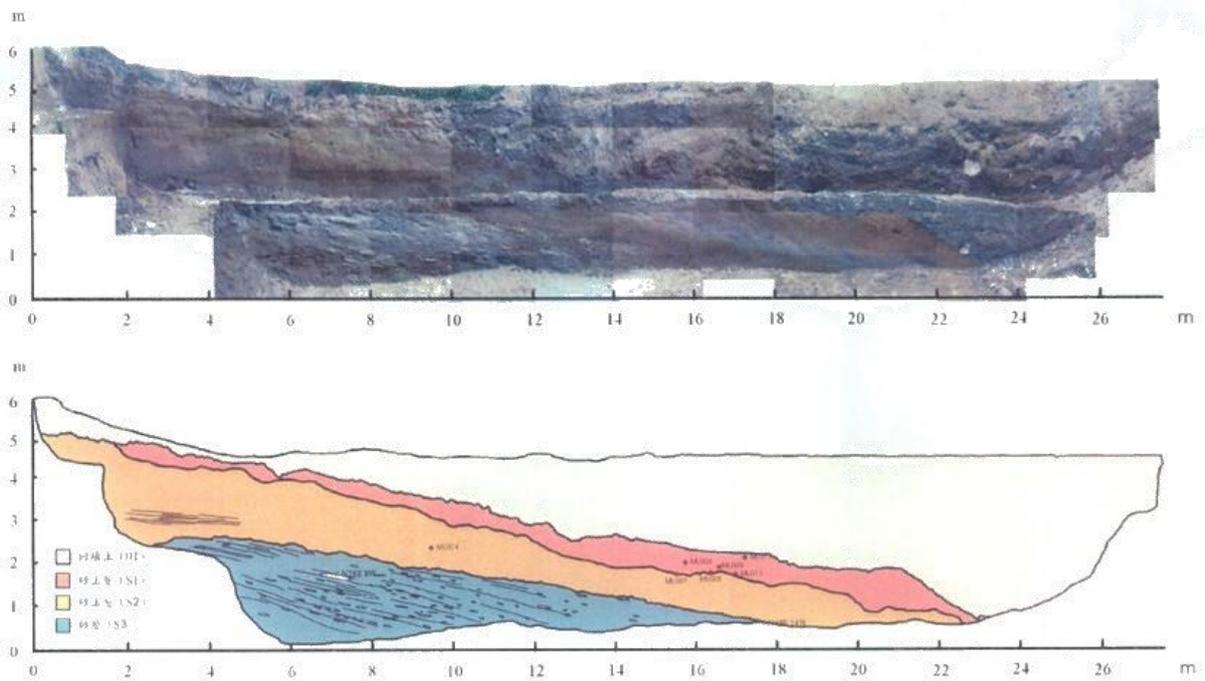


圖 27 花蓮機場內東側崖邊槽溝南牆剖面(摘自陳文山，2004)



圖 28 花蓮機場內東側崖邊槽溝東南側之水平砂層露頭(摘自陳文山，2004)

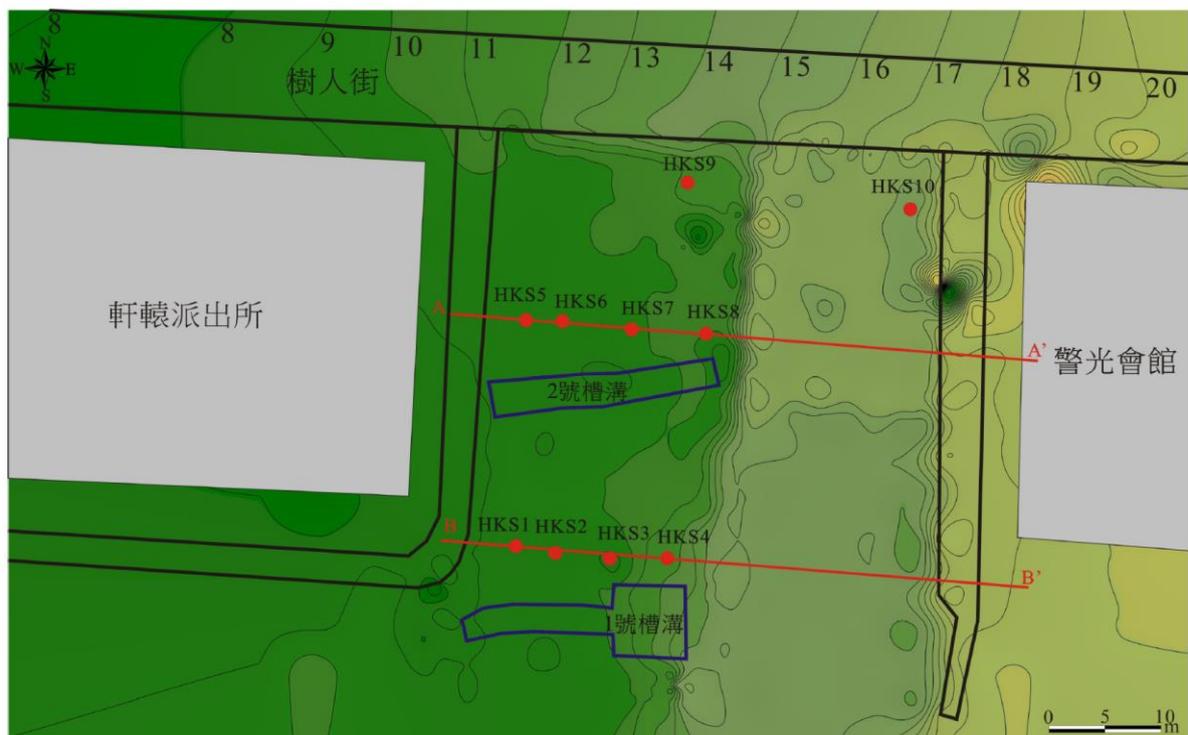


圖 29 花崗山西側槽溝及井位分佈(摘自陳文山等，2012)。一號槽溝位於二號槽溝南側，A-A'與 B-B'則為排鑽之鑽井剖面。

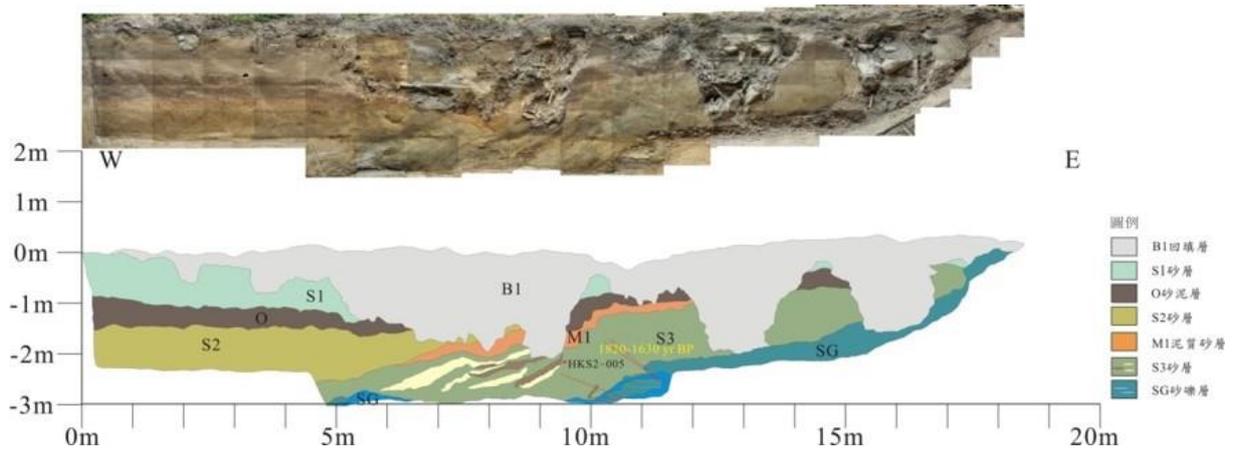


圖 30 花崗山槽溝二號槽溝北牆剖面(摘自陳文山等，2012)

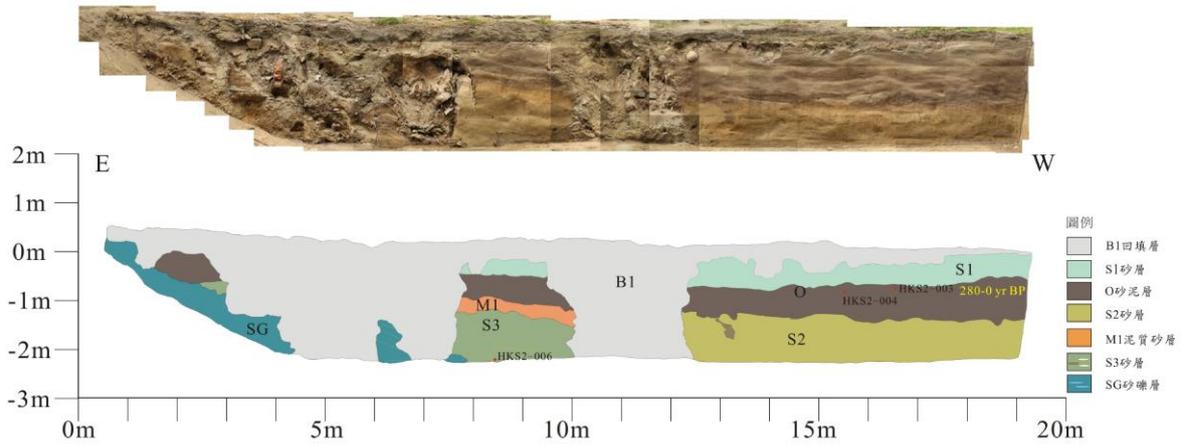


圖 31 花崗山槽溝二號槽溝南牆剖面(摘自陳文山等，2012)

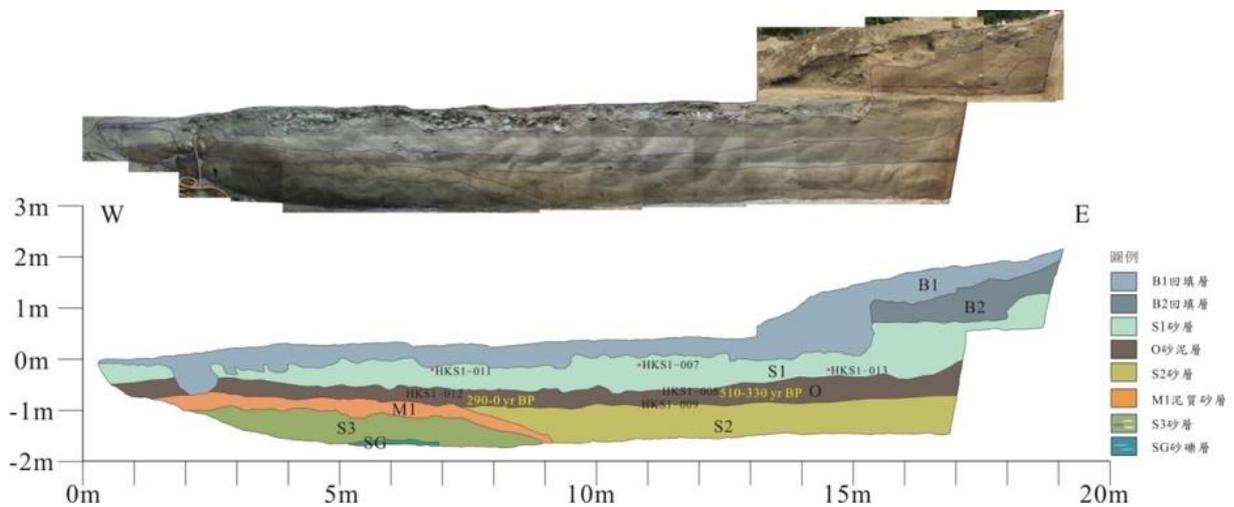


圖 32 花崗山槽溝一號槽溝北牆剖面(摘自陳文山等，2012)

3-3 米崙斷層的地震再現週期與長期抬升速率

活動斷層的地震再現週期與抬升速率對於評估地震災害甚至下次地震的預測有重要的影響，而地震再現週期及抬升速率的評估方式有許多，包含活動斷層的古地震槽溝研究、斷層抬升所致之地形特徵，或是利用斷層資訊來評估等方式。以下將分別介紹過去有關米崙斷層的地震再現週期及抬升速率相關研究。

3-3-1 地震再現週期

地震再現週期為每一次造成斷層活動的地震之時間間隔，常用的地震再現週期評估方式包含古地震槽溝開挖及斷層相關參數的數值估算。關於米崙斷層的地震再現週期，Shyu et al. (2016)利用斷層的長度與寬度計算米崙斷層可能的地震矩規模，以及每次地震的平均位移量為 0.68 米，並用平均位移量除以斷層滑移速率得到米崙斷層的再現週期為 70 年。饒瑞鈞等 (2006)分析米崙斷層的斷層剖面速度場變化，顯示平行斷層走向為 8.6 mm/yr，垂直斷層走向為 7.2 mm/yr，高程方向抬升量為 8.9 mm/yr，精密水準測量顯示斷層垂直位移速率為-17.9 mm/yr。相對於 1951 年地震的右移量 2 米及垂直位移量 2.1 米為準，則再現週期約為 67~178 年。

3-3-2 長期抬升速率

活動斷層的長期抬升速率評估方式有許多種，包含利用地形上如河階或海階等特徵並配合定年資料估算。由於米崙台地上有許多不同高程的海階階地，過去多以海階上的化石進行定年，進而推算長期的抬升速率(表 3)。Bonilla (1975)以海洋沉積物的抬升量配合碳十四定年的年代，估算出米崙斷層的抬升速率為 4.6-8.7 mm/yr。Yamaguchi and Ota (2002)亦藉由海階沉積物

之定年資料估算出抬升速率約 5-8 mm/yr。陳俊甫(2013)則是將海階上的珊瑚化石進行 U-Th 定年，並計算出抬升速率為 6.93 ± 0.03 mm/yr。

表 3 米崙台地前人研究之定年資料

文獻	樣本編號	海拔高程(m)	¹⁴ C 定年 (yr BP)	U-Th 定年(yr BP)	抬升速率 (mm/yr)
Bonilla (1975)	CT-1(Konishi et al., 1968)	25	2880±120	-	8.7
	NTU-5 (Lin, 1969)	20	3990±269	-	5.2
	NTU-13 (Lin, 1969)	14	3200±300	-	4.6
Yamaguchi and Ota (2002)	HT28	12	2618- 2297	-	5-8
陳俊甫(2013)	ML-004	27.292	-	3936±16	6.91-6.93

第四章 研究方法

4-1 跨斷層槽溝開挖

跨斷層槽溝之開挖為古地震研究中常用的研究方法，透過開挖與地表構造線垂直之地下剖面瞭解地下岩層或沉積層與構造間的截切關係，並配合定年結果分析，可以推估槽溝剖面中所紀錄的古地震事件，進而推算斷層的活動性以及地震的回歸週期，同時亦可藉由槽溝的開挖獲得構造與岩層的位態資訊。若槽溝中出露的斷層之上下盤岩層能有具特定特徵的岩層做為指標層，更可以進一步推算斷層上盤的相對抬升速率。

4-1-1 槽溝選址

2018 年花蓮地震發生後，米崙斷層跡沿線出現許多地表破裂的現象，由於米崙斷層主要為左移斷層，因此斷層跡沿線出現許多雁行排列的地表破裂現象，例如東華大學美崙校區內操場可以看到雁行排列之地表破裂(圖 33)。本研究選定於花蓮七星潭海岸南南西方向約 1.8 公里處進行槽溝開挖工作，此處為米崙斷層北端，且 2018 花蓮地震後亦可在選定開挖場址的草地上發現雁行排列之破裂跡(圖 34)。本研究一共開挖三個槽溝，分別稱為 1a 槽溝、1b 槽溝及 2 號槽溝(圖 35)，其中，1b 槽溝為 1a 槽溝往北方延伸之槽溝，彼此相互重疊約 3 米，而兩槽溝之牆面亦發現能對比的沉積層，因此後續的研究成果將合併兩個槽溝的資料並稱為 1 號槽溝。1a 槽溝開挖工作由陳文山老師執行，因此本研究中此槽溝資料多由陳文山老師提供。1a 槽溝及 2 號槽溝皆跨過雁行排列之地表破裂跡，因此槽溝牆面亦可觀察到由破裂跡向下延伸之破裂面。

1a 槽溝一共開挖兩階，全長約 16 米，寬 4.5 米，深 3 米(圖 36)，槽溝長邊方向為 N6°W；1b 槽溝則是開挖兩階之後再將一部分加深 2 米，全長

約 18 米，寬 4 米，深度最深可達 7.5 米(圖 37)，槽溝長邊方向為 N12°W。根據槽溝方向，1a 槽溝及 1b 槽溝可觀察到的地下剖面分別有東牆、西牆及南牆。此外，2 號槽溝亦開挖兩階，然而開挖過程中因接觸到地下水面，僅第一階保留較完整，第二階則被地下水面覆蓋，僅出露部分沉積層，2 號槽溝全長 23 米，寬 8 米，深度受地下水面影響僅 3.5 米(圖 38)，槽溝方向為 N68°W，2 號槽溝的開挖結果顯示地表破裂跡實際上是沿著一 L 型擋土牆向下延伸破裂，並非能夠指示米崙斷層的破裂面，而擋土牆底部深度約 2 米，以上皆為人工回填土所填蓋。



圖 33 東華大學美崙校區操場之雁行排列破裂跡(摘自中央地質調查所，2018)



圖 34 槽溝位置之雁行排列破裂跡。紅色箭頭指示出破裂跡位置，虛線範圍為 2 號槽溝位置，拍攝當時此槽溝尚未開挖。

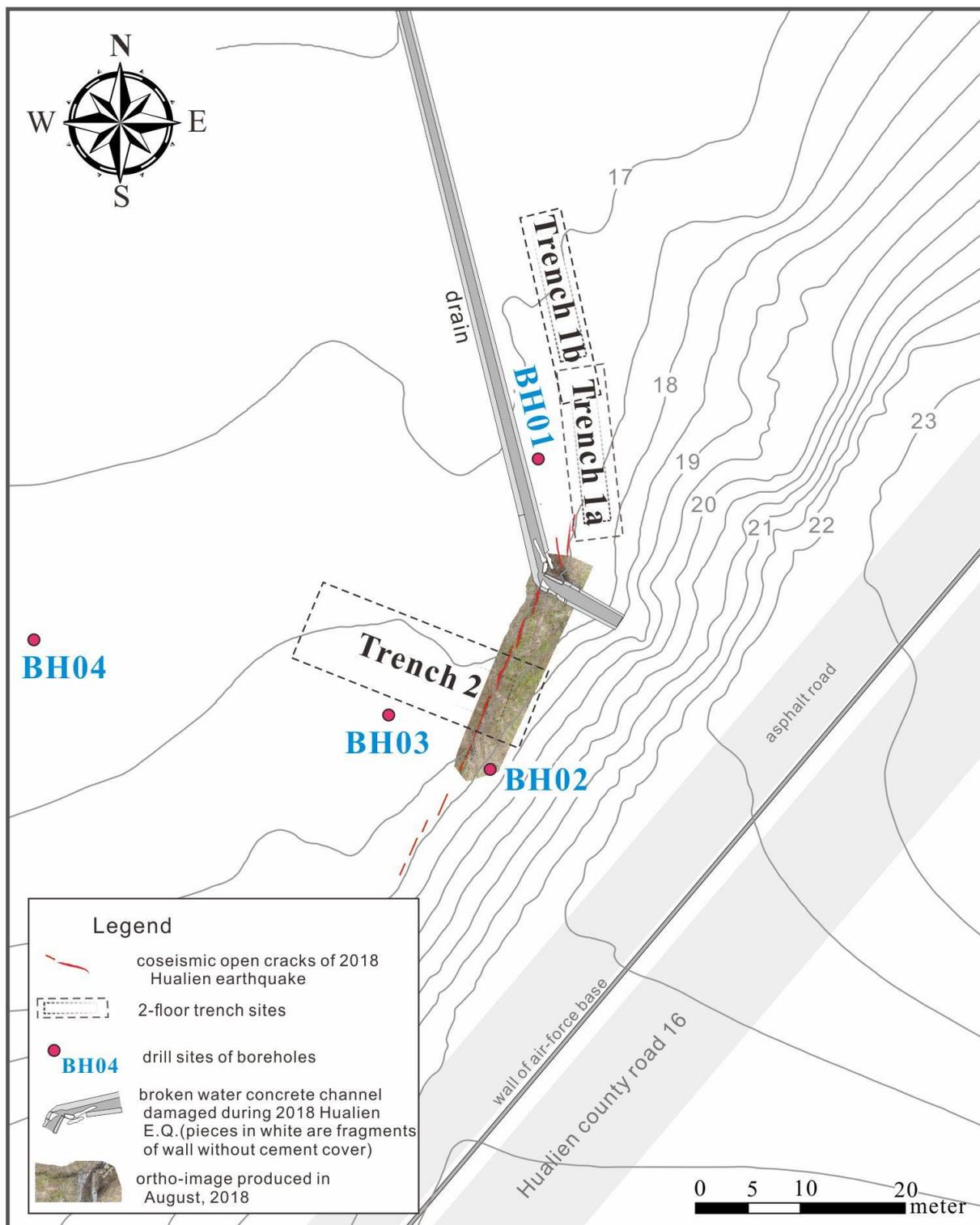


圖 35 槽溝與鑽井位置分布圖及雁行排列地表破裂跡。2018 花蓮地震於此處造成地表破裂及溝渠的破壞，紅色部分即為呈現雁行排列的破裂跡，虛線為三個槽溝的開挖範圍，紅點為四口鑽井位置。



圖 36 1a 槽溝全景圖



圖 37 1b 槽溝全景圖



圖 38 2 號槽溝全景圖。紅色箭頭為地表破裂跡位置。

4-1-2 開挖流程

槽溝開挖作業可分成數個階段，包含：場址調查、地形測量、槽溝挖掘、清理溝壁、設置網線、照相與描述。

1. 場址調查：本研究選址依據主要考量於 2018 花蓮地震中產生地表破裂之位置，詳細描述可參考上一小節之內容。
2. 地形測量：確認開挖位置後，必須先清楚顯現槽溝周遭地形，本研究主要使用衛星定位儀進行動態測量，並製成 100 m × 80 m 之地形圖。
3. 槽溝挖掘：由開挖機具依預定的槽溝大小深度挖掘(圖 39)，本研究所開挖的槽溝尺寸大小已於上一小節說明。
4. 清理溝壁：在大型機具將槽溝大致輪廓挖出後，接著以刮刀清理溝壁，目的在於使細部的沉積層與構造顯現(圖 40)，並以鐵釘標示牆面上所判釋出的層面或構造面位置。
5. 設置網線：在清理平整的牆面上設置水平與垂直的網格線，本研究中水平格線間距為 1 公尺，垂直格線間距為 2 公尺(圖 41)。
6. 照相與描述：本研究利用 PIX4D 軟體合成出 3D 的槽溝影像(圖 42)，此套軟體能匹配出兩張照片相互重疊的部分，因此以不同角度拍攝整個槽溝，大量重疊率高的照片便能合成出 3D 槽溝影像，此套軟體亦可正射化槽溝壁面。現場描述與紀錄的內容包含沉積層分布、地層及構造的位態及定年標本採樣位置。



圖 39 槽溝開挖過程



圖 40 溝壁清理



圖 41 設置水平及垂直網格線



圖 42 PIX4D 軟體合成之 3D 槽溝影像

4-2 碳 14 定年法

自然界中存在的碳共有三種： ^{12}C 、 ^{13}C 、 ^{14}C ，前兩者為穩定同位素，能夠於自然界中穩定存在，且為自然界中碳的主要成分， ^{14}C 為具有放射性的碳同位素，在自然界中僅占 $1.2 \times 10^{-10}\%$ ， ^{14}C 定年方法可以測定近五萬至六萬年內的含碳物質的年代，對於地質學、考古學…等領域是重要的研究工具（劉聰桂，1997）。

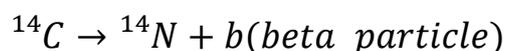
4-2-1 ^{14}C 分析方法分類

^{14}C 分析方法主要仰賴於核物理的技術，可分為兩大類：

1. 放射性法(β -counting 法)：放射性法的基本原理為測定由 ^{14}C 放射出的 β 粒子數量估算 ^{14}C 含量，放射性法的發展依據樣本製備的不同可分成固體、氣體、液體測量三個發展階段，隨著技術的進步，從起初較為複雜的操作方法亦逐步改進到簡單、方便，並應用到更多不同的科學領域中，尤其在最後一個發展階段，針對 ^{14}C 年代的樹輪校正年代問題做了大量工作，使 ^{14}C 定年方法更為精確、可靠。此方法發展至 1965 時已幾乎到達了極限，氣體法樣品量僅需 50mg，液體法僅需 500mg，最高可測年限為 60000 年，而測定所需天數僅需數天。
2. AMS 法(Accelerator Mass Spectrometry，加速器質譜法、原子計數法)：自 1978 年開始發展，隨著核物理學中加速器、粒子分析等技術的進展，發展出利用加速器質譜法直接測量 ^{14}C 原子數目，此測定方法比先前的放射性法更為靈敏，放射性法每天僅能計測樣品中 ^{14}C 總數的三百萬分之一，加速器質譜法則能於數小時內計測出樣品中全部 ^{14}C 原子數，測量時間縮短數十倍，而樣品量僅需幾十毫克至幾毫克。本研究中的 ^{14}C 樣品皆送至美國邁阿密的 Beta 實驗室，即是使用 AMS 定年分析方法。

4-2-2 ^{14}C 半衰期

存在於動植物體內的 ^{14}C 會在其死亡後開始逐漸衰變， ^{14}C 衰變的化學反應如下：



從反應式中可知 ^{14}C 在衰變後會變回 ^{14}N ，並釋放出電子，此衰變反應稱為 β 衰變，而半衰期是指放射性元素衰變至原本原子數目的一半所需的時間，因此半衰期是年代計算公式中重要的一個參數，其誤差值會直接影響年代的精確度。1949 年由 Libby、Anderson 及 Arnold 測量出 ^{14}C 的半衰期為 5568 ± 30 年 (Libby and Arnold, 1949)，並一直沿用至今，而測量所得年代為“距今計年” (Before Present，簡稱為 BP)，而國際上通用是以 1950 年當作“今”年往前起算的。

4-3 地質鑽井

本研究中一共鑽取 4 口岩心，編號 BH-01 的井位於 1 號槽溝旁 2-3 公尺的位置，井深 30 米，編號 BH-02~04 的井則位於 2 號槽溝旁，且三口井相連的方向與米崙斷層跡方向垂直(圖 43)，BH-02 位於米崙斷層上盤，井深 20 米，BH-03 及 BH-04 位於斷層的下盤，井深皆 30 米。

由於出露於槽溝中的斷層上下盤沉積物岩性並無良好的層序關係能夠對比，故難以估算斷層的錯移量，本研究鑽井主要目的為期望能將斷層上下盤的岩性進行對比，並綜合槽溝的沉積層序來建立此區域完整的近地表沉積層序，進而推算斷層的垂直錯移量。



圖 43 BH-02、BH-03 與 BH-04 分布圖。照片中三口井的分布方向(黃色虛線)與 2 號槽溝長邊平行，並與地表破裂跡(紅色虛線)相互垂直。

第五章 槽溝與鑽井結果

5-1 1 號槽溝

1 號槽溝實際上為 1a 槽溝及 1b 槽溝的合併，槽溝方向大致為南北走向，故兩個槽溝皆可分成東牆、西牆及南牆。由於兩槽溝有相互重疊的部分，因此本研究將兩個槽溝牆面合併成 1 號槽溝牆面的正射影像來呈現(圖 44)，合併後槽溝剖面長度約 35 米，深度約 7 米，南牆則個別以照片呈現(圖 45、圖 46)，其中 1a 槽溝因不斷有水滲入，可能與地下水面高有關。槽溝中主要出露尚未膠結的沉積層，從正射影像可知，1a 槽溝以海相沉積的砂層及礫石層為主，1b 槽溝則以陸相的泥質砂層或土壤化砂層為主，表層為厚度約 2 米的人工回填層(Backfill)，接下來將說明 1 號槽溝牆面出露的沉積層及構造，以及樣本定年結果。

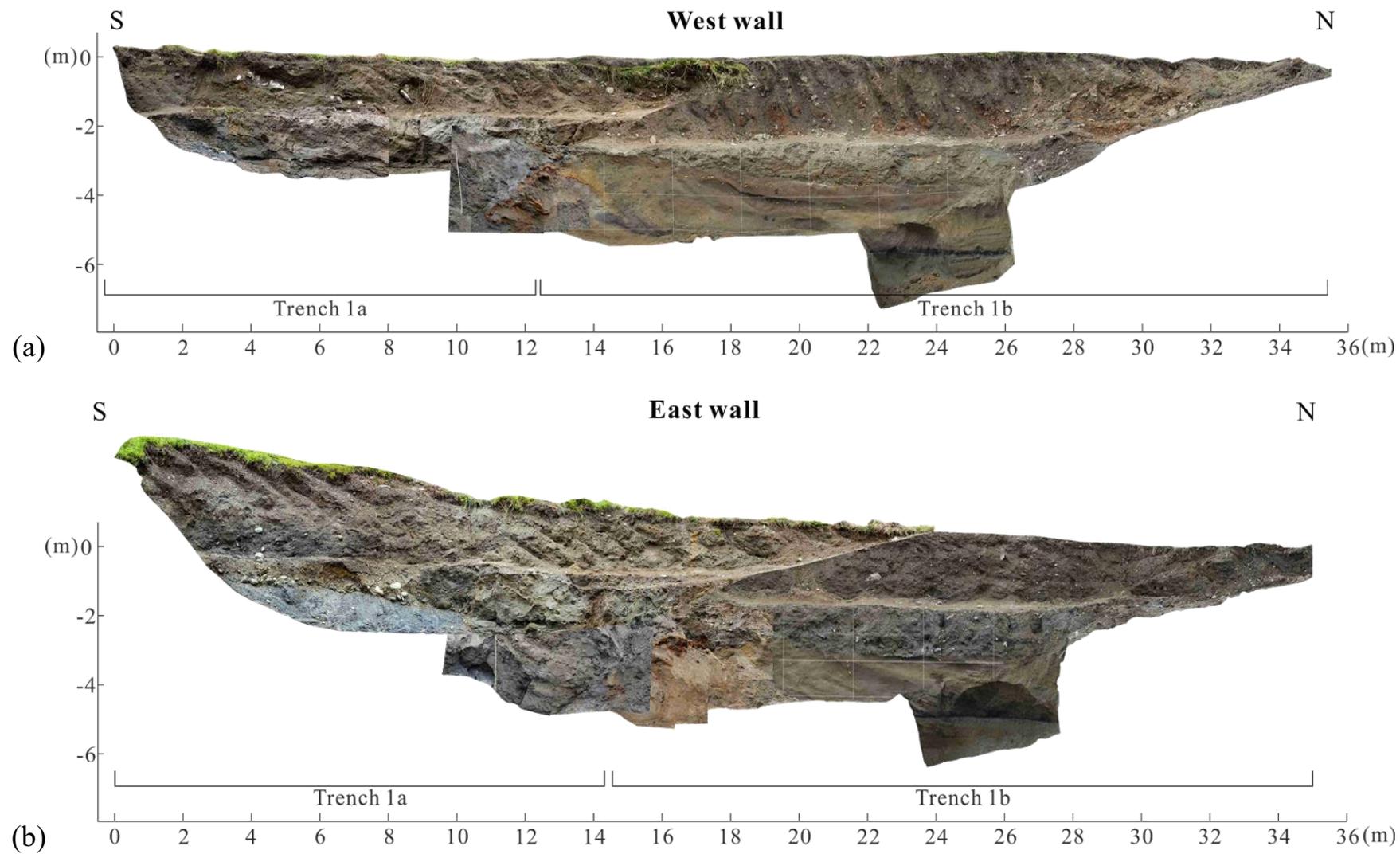


圖 44 1 號槽溝正射影像圖。(a)西牆正射影像圖(b)東牆正射影像圖(鏡像反射)。



圖 45 1a 槽溝南牆照片。照片中可見兩顆崩落的巨礫，且水不斷滲至槽溝內。



圖 46 1b 槽溝南牆照片

5-1-1 沉積層描述與分類

根據沉積環境的不同，可將 1 號槽溝的沉積層先區分成三大類，包括礫石層、海相砂及陸相砂，接著再根據是否具有對比的指標性或是具有重要的形成原因及意義，將沉積層做分層，因此根據以上原則，可將 1 號槽溝區分出九層沉積層，以下九個沉積層將由老至年輕分別描述：

1. 泥質礫岩(Unit 9)：本層為基質支持的半岩化礫岩層(圖 47)，以青色泥為基質，礫石的直徑分佈約 1 至 10 公分，呈橢圓狀且無稜角，淘選度差，礫岩厚度至少 1 米，由於未挖穿礫岩底部，故無法得知其真實厚度。部分可觀察到礫石呈高角度排列並向南傾，而此層與覆蓋於其上的 Unit 8 呈交角不整合關係。根據本層已呈半岩化且基質含泥量多，且地理位置上距七星潭不到 2 公里，推測此礫岩可能即為七星潭海岸出露的米崙鼻礫岩(圖 48)，然而缺乏定年年代證據支持。
2. 砂質礫石層(Unit 8)：本層為顆粒支持的砂質礫石層(圖 47)，以黃棕色砂層為基質，淘選度極差，礫石直徑分佈約數公分至數十公分，最大可達約 30 公分，巨礫多分布於本層底部，最大直徑方向與不整合面平行，不整合的走向約為 N40°E，傾角為 12°向西北傾，本層視厚度約 0.5 米。
3. 中砂層(Unit 7)：深灰色中砂層(圖 49)，砂質含量比例高，砂層呈塊狀且淘選度佳，厚度至少 1.25 米，然而本層以上由回填土覆蓋，因此無法得知實際之上邊界位置。Unit 9 至 Unit 7 僅出露於槽溝中主斷層的上盤部分。
4. 中砂-粗砂層偶夾薄礫石層(Unit 6a、6b)：Unit 6 以青灰色中砂為主，Unit 6a 沉積於 Unit 6b 之下，Unit 6a 偶夾薄礫石層(圖 50、圖 51)，Unit 6b 則夾約 10 至 15 公分厚的薄粗砂層(圖 50)，另外本層部分區塊因鈣化、膠結作用而較為堅硬，因此於槽溝中可見鈣化的交錯層理(圖 50)。本層

厚度大於 4.48 米，並出露於槽溝中主斷層下盤與分支斷層上盤之間，Unit 6b 上邊界則出露於 1b 槽溝的底部，但由於無法得知缺失的層厚，因此僅能粗估厚度。本層位態為 N22°E，30°W。

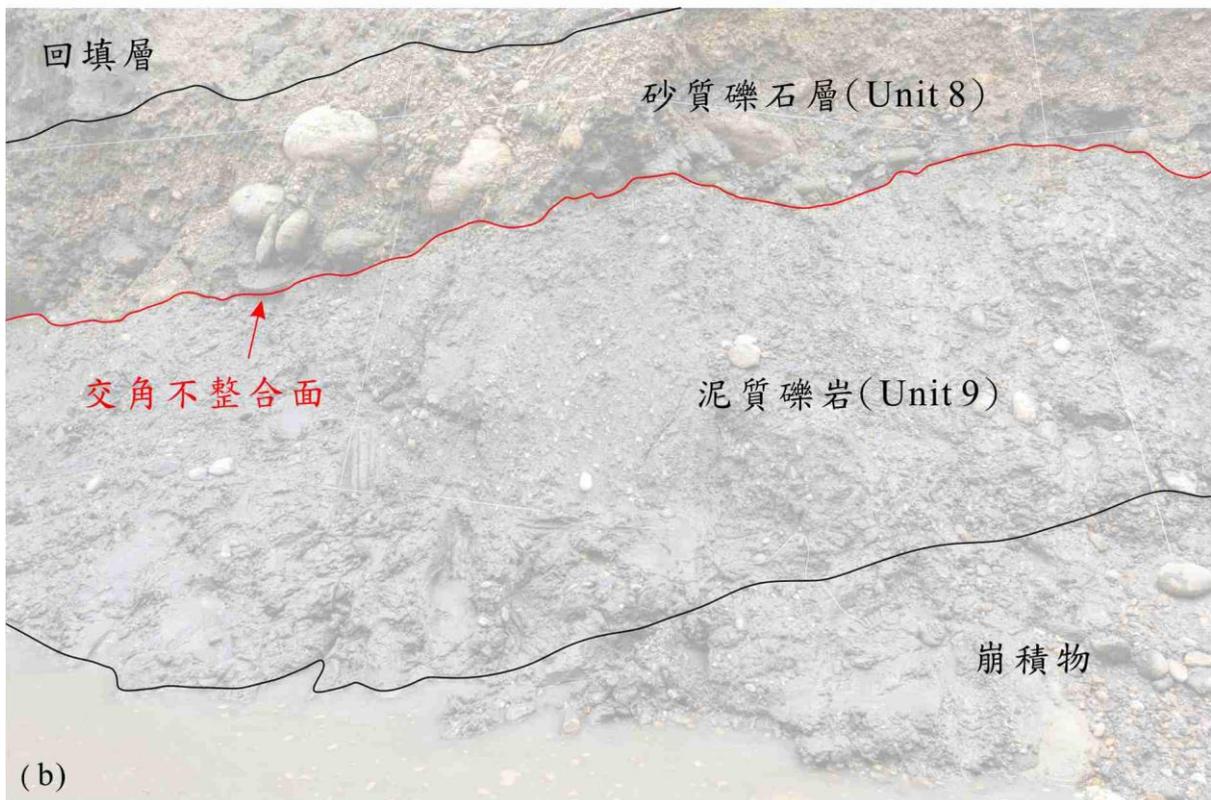
5. 碳質黑色泥層(Unit 5)：本層為深黑色含碳泥層，向上顆粒逐漸變粗，含砂量變多，底部有約 2 公分厚的黑色泥質碳層(圖 52)，但本層僅延續至分支斷層附近即消失，且從 1b 槽溝的東西牆及南牆可以看到本層皆受到液化作用影響，故在液化的界面形成明顯的邊界(圖 53)。根據沉積物內容推測本層的沉積環境為沼澤底部，屬於較為安靜的沉積環境，而且豐富的含碳量說明曾有大量的植物生長，本層厚度約 14 公分，位態則從水平逐漸變陡至 22°。
6. 黃灰色中砂質崩積層(Unit 4)：本層以黃灰色中砂為主(圖 54)，富含黏土礦物，厚度變化大，最厚可達 1 米，然後厚度逐漸變薄甚至尖滅。整體形狀呈現楔形，雖然整體的沉積物粒徑差異並不大，但本層砂質可根據顏色判斷其並不均質，亦出現一顆數公分大的礫石，因此推測本層為崩積層。崩積層為地表因斷層活動出現破裂後，斷層上盤物質與土壤碎屑崩落並堆積於下盤近斷層處，若有多次斷層活動，可能會看到最新的崩積層內會夾有較老的崩積層(圖 55)。
7. 泥質細砂層、土壤化泥質細砂層及鬆散中砂層(Unit 3a-3e)：本層為泥質砂層(圖 56)，主要細砂至中砂為主，並且含有黏土礦物。根據顏色的不同，將其再細分成五個單元，其中 Unit 3a 跟 Unit 3c 因富含有機質而使顏色呈深灰色，指示過去曾經是暴露於陸地上的土壤層；Unit 3b 呈現黃色；Unit 3d 則呈現紅棕色；Unit 3e 的組成與其他四層較為不同，為鬆散的透鏡狀砂體，砂的組成為中砂至粗砂，且含有貝類化石，本層僅出露於 1 號槽溝西牆，東牆未見此層。

8. 橘黃色細砂質崩積層(Unit 2):本層為橘黃色細砂層,厚度最厚約 0.4 米,其形狀呈楔形體(圖 54),與 Unit 3 之間為不整合接觸,且可以看到與 Unit 3 相同物質以塊狀沉積於 Unit 2 底部(圖 57),可能是本層堆積過程中刮蝕 Unit 3 的物質而形成,故推測本層亦是因斷層錯動抬升而形成之崩積體。本層僅出露於 1 號槽溝西牆。
9. 深棕色有機泥層(Unit 1):本層物質以深棕色泥層為主(圖 58),富含有機物質,厚度僅 6 公分,為槽溝中最年輕的沉積層,僅出露於 1 號槽溝西牆。

根據上述的分層方式將 1 號槽溝的東牆及西牆剖面進行繪製,繪製後的成果如圖 59,槽溝兩階之間空白的部分為階面,紅色實線用來表示主斷層面,黑色實線則為分支斷層,黑色虛線為因液化作用所形成的界面。



(a)



(b)

圖 47 泥質礫岩(Unit 9)與砂質礫石層(Unit 8)。(a)1a 槽溝東牆照片(b)分層示意圖。Unit 9 與 Unit 8 之間以交角不整合關係接觸。



圖 48 七星潭海岸的米崙鼻礫岩

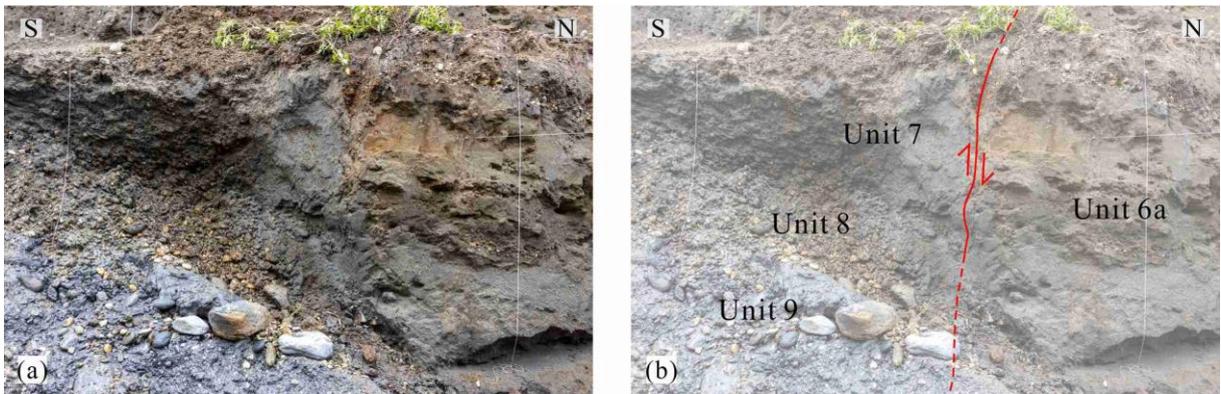


圖 49 深灰色中砂層(Unit 7)。(a) 1a 槽溝西牆第二階最南側的照片(b)此照片範圍出露的上盤沉積層包含 Unit 7、Unit 8 及 Unit 9，下盤則是 Unit 6a，紅色為西牆所觀察到的斷層，箭頭指示上下盤相對錯移方向。

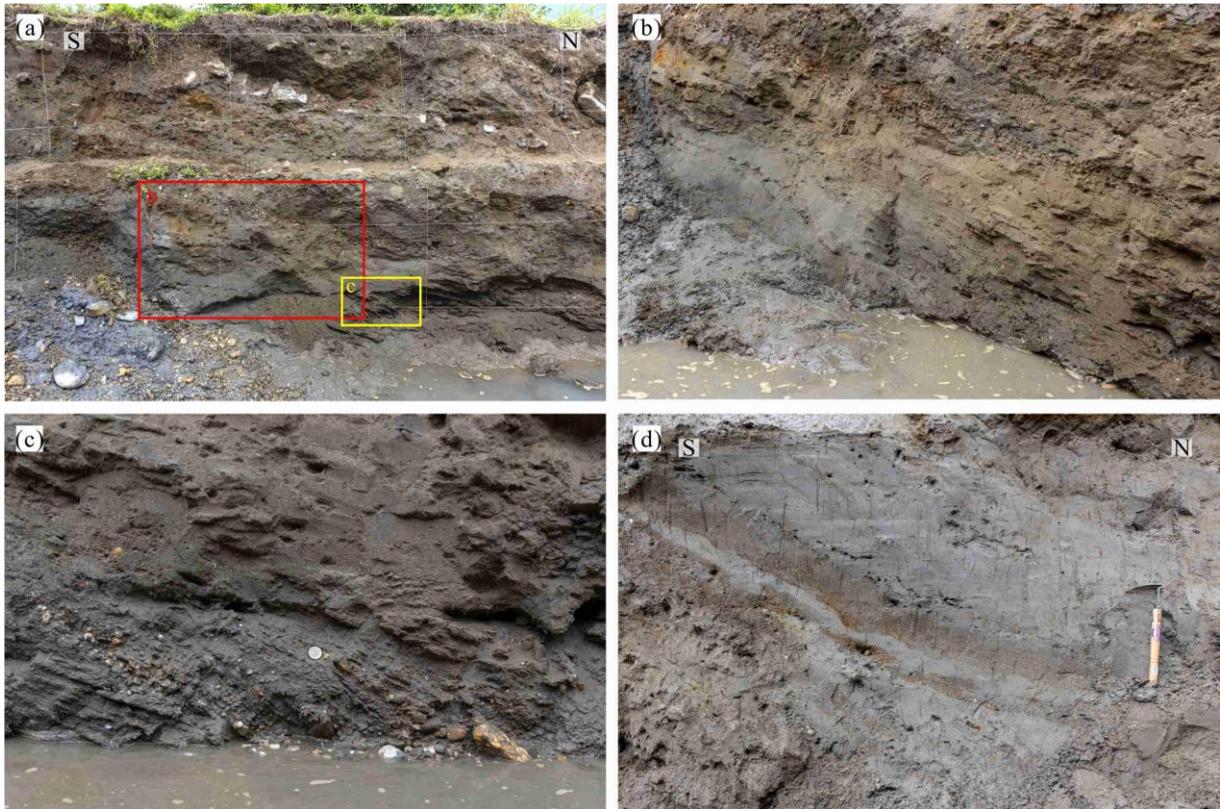


圖 50 中砂-粗砂層偶夾薄礫石層(Unit 6a、6b)。(a) 1a 槽溝西牆照片 (b) 本照片位於圖 a 紅框部分，可看到中砂層夾薄礫石層(Unit 6a)，並且出露受鈣化作用而較為堅硬的結核 (c) 本照片位於圖 a 黃框部分，出露於 Unit 6a 中的交錯層理 (d) 中砂層夾 10 至 15 公分厚的粗砂層(Unit 6b)。



圖 51 1a 槽溝東牆的中砂層夾薄礫石層(Unit 6a)



圖 52 碳質黑色泥層(Unit 5)。本照片位於 1b 槽溝南牆及西牆照片，白色箭頭所指的即為厚度約 2 公分的黑色泥質炭層，且可看到顏色向上逐漸變淺，顆粒大小也從泥質變成砂質。

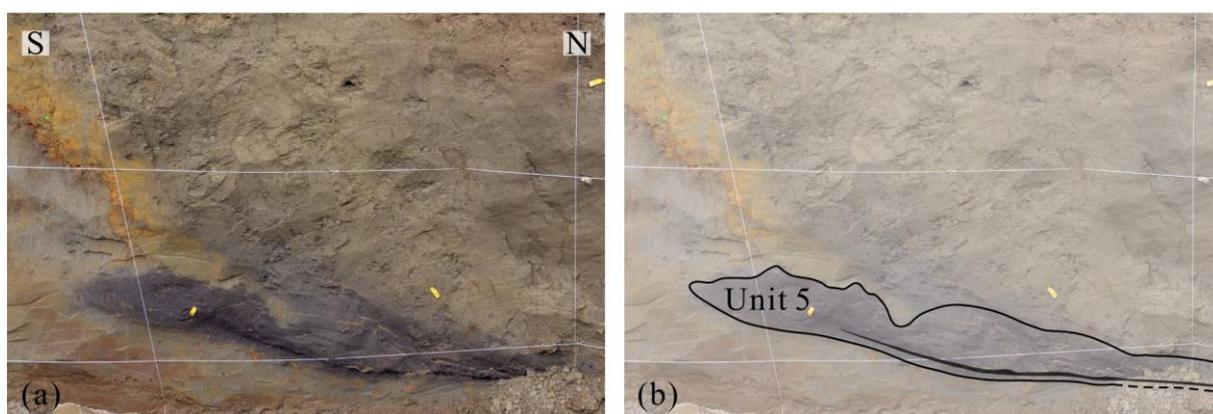


圖 53 延續性不佳之碳質黑色泥層(Unit 5)。(a)本照片攝於 1b 槽溝西牆(b)可觀察到 Unit 5 這層的延續性並不好，並且受液化作用而形成明顯的邊界，另外本層傾角是從近乎水平逐漸變陡的。

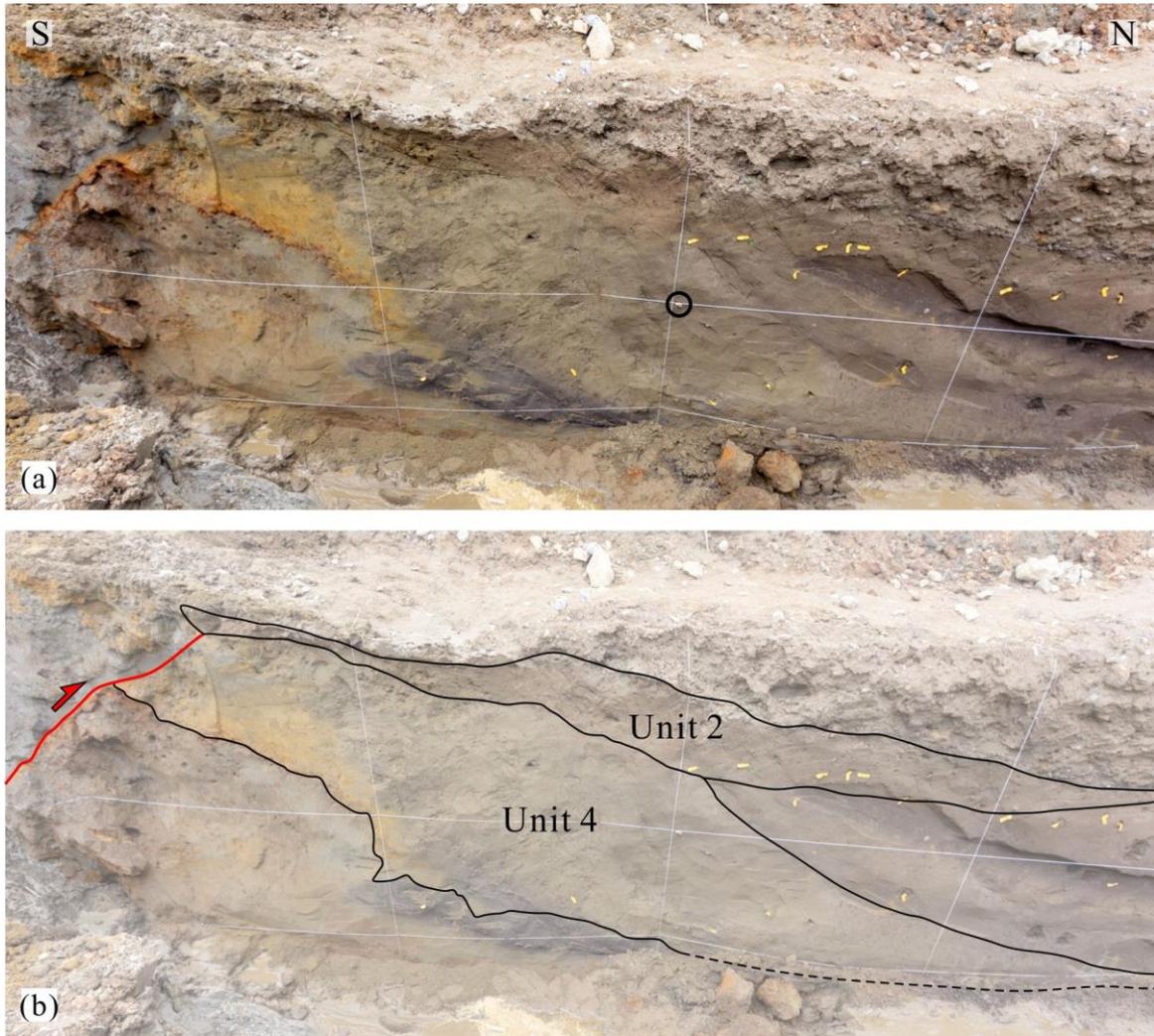


圖 54 1b 槽溝的楔形崩積層(Unit 4 及 Unit 2)。(a)本照片攝於 1b 槽溝西牆，黑色圓圈處為 Unit 4 中唯一出現的礫石(b)分支斷層並未截穿 Unit 2，說明其在 Unit 2 沉積後至今並未活動。

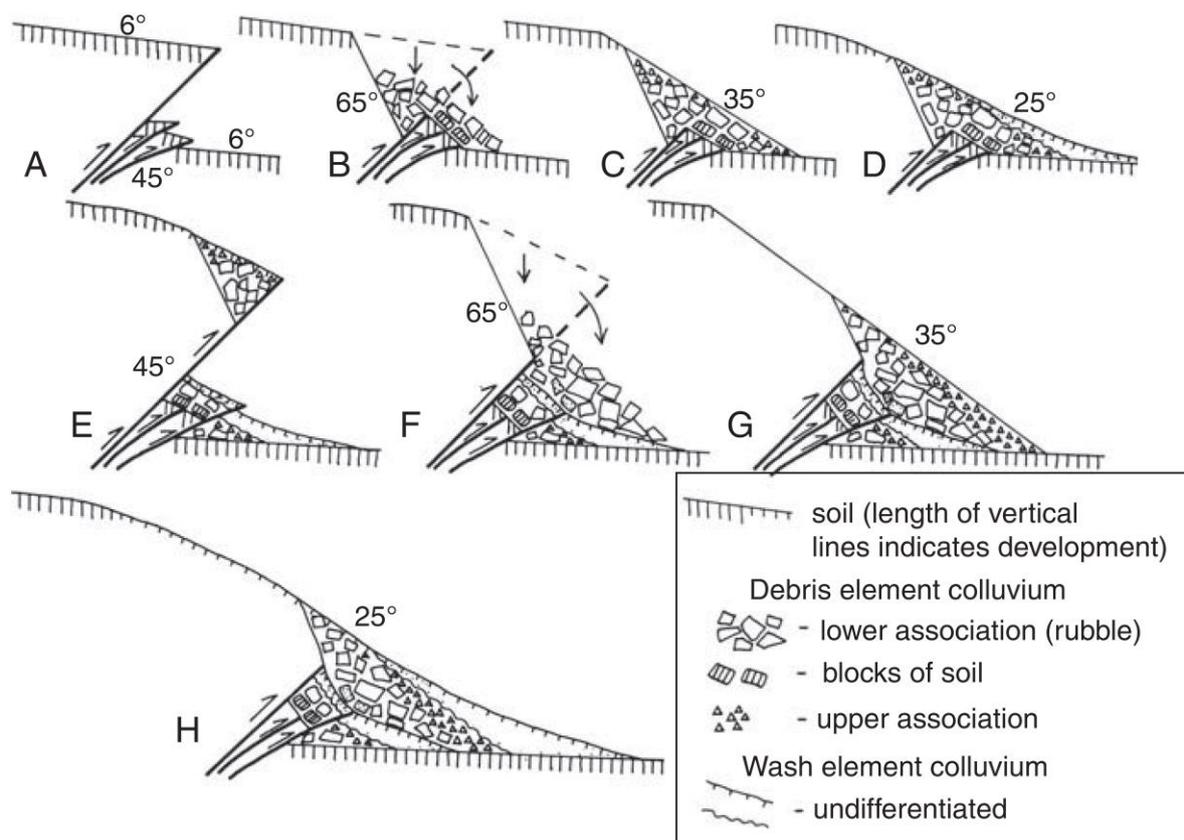


圖 55 逆斷層相關之崩積楔形體形成過程。(A)因斷層活動致使斷層上盤抬升(B)斷層上盤物質因重力而崩落並堆積於斷層面上，此時通常所堆積的沉積物粒徑大小分佈極為不均，且無沉積層理，此時期通常為地震發生後短時間會出現之現象(C)在地震過後約數月至數年後，此時期會以較細顆粒的物質覆蓋於原先堆積的崩積物上，並形成與斷層傾沒方向相反的坡面(D)崩積楔形體上覆蓋細顆粒沉積物(E)-(H)第二次斷層錯動發生，並在舊的崩積體上形成一個新的崩積楔形體。

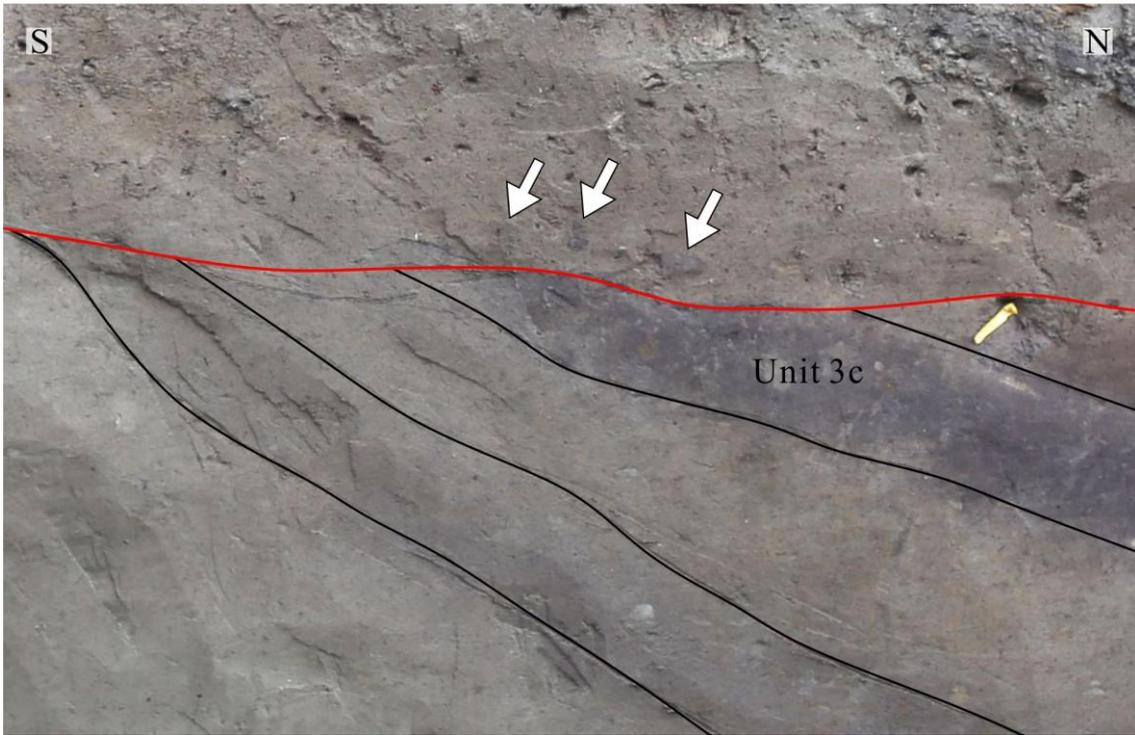


圖 57 Unit 3c 砂體。本照片攝於 1b 槽溝西牆，白色箭頭所指之黑色球狀砂體即為 Unit 3c 的物質，紅色實線則為 Unit 3 與 Unit 2 的不整合面。



圖 58 深棕色有機泥層(Unit 1)。本照片攝於 1b 槽溝西牆。

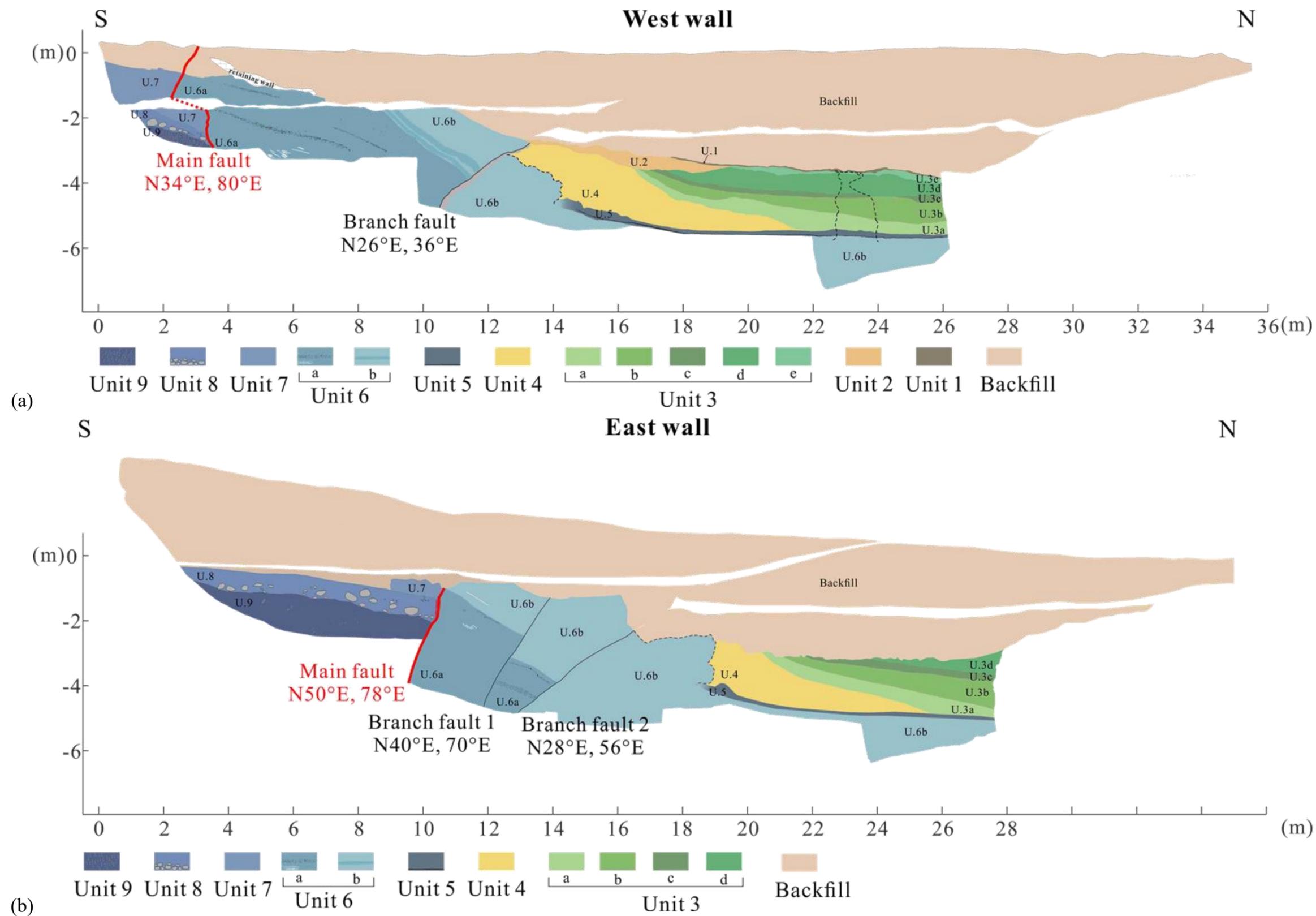


圖 59 1 號槽溝西牆及東牆解釋圖。(a)西牆剖面(b)東牆剖面(鏡像反射)。

5-1-2 構造描述

1 號槽溝的構造可以分成西牆及東牆來描述。西牆的剖面一共可以觀察到兩條斷層(圖 59)，較為靠近剖面南側的斷層為主斷層(圖 60)，判斷依據是此斷層上盤所出露的沉積層最老，包含米崙鼻礫岩的出露，故判斷其為主斷層。主斷層走向為 N34°E，傾角則是 80°向東傾，另外在斷層面附近的沉積層都有剪切面的出現，且此斷層面於 2018 的花蓮地震有破裂至地表，說明其為本次地震中有活動的斷層面。西牆的另一條則是分支斷層(圖 61)，走向為 N26°E，傾角則是 36°向東傾，位於上盤的 Unit 6a 錯移至 unit 4 之上。從剖面上所能判斷分支斷層的最大錯移量為 1.3 米，但由於分支斷層並未錯斷任何沉積層，故缺少能夠用來推算實際錯移量的指準層。分支斷層的尖端未截穿 unit 2，說明在 unit 2 沉積後此斷層未再活動。

東牆的剖面則可觀察到三條斷層，包含一條主斷層及兩條分支斷層(圖 59)。主斷層走向為 N50°E，傾角為 78°向東傾(圖 62)，而在東牆並未觀察到 2018 花蓮地震造成的破裂跡，說明本次地震的破裂跡並未延伸至此剖面，斷層上盤出露的沉積層與西牆相同，包含砂質礫石層(unit 8)及米崙鼻礫岩(unit 9)，下盤則皆為中砂層夾礫石層(unit 6)，在斷層面附近的砂層或礫石層中可以觀察到數道與斷層面平行的剪切面(圖 62)。兩條分支斷層的走向則分別是 N40°E 與 N28°E，傾角則分別以 70°及 56°向東傾(圖 63)。從剖面上所推估的最大錯移量約 0.8 米及 1.54 米，同樣由於缺乏指準層而無法推算實際錯移量。

由於缺乏可以對比的指準層，且上下盤部分沉積層的厚度無法得知，因此位於西牆及東牆的主斷層皆無法推算錯移量或垂直抬升量，此部分皆藉由鑽井的資料來進行估算。而分支斷層於東牆出露兩個斷層面，與西牆所出露的數量並不同，可能的解釋為原先僅一條的分支斷層恰好在槽溝中間分

岔成兩條分支斷層。

另外，在 1b 槽溝的剖面可觀察到向上褶曲的沉積層及液化現象。Unit 3a、Unit 3b 及 Unit 3c 這三層的沉積層角度是從近乎水平由北往南逐漸變陡 (圖 64)，且厚度也隨著逐漸變薄最後尖滅，Unit 3a 最大角度可至 30° ，最上層的 Unit 3c 最大角度則為 22° ，說明這三層在靠近分支斷層的部分可能受到斷層活動影響而變形褶曲。液化現象常是地震發生後常見的現象之一，而 1b 槽溝有三處可以看到液化現象的影響，第一處為槽溝西牆靠近北邊位置，此處的液化現象可以觀察到其顏色較周圍沉積層的顏色較深，但仍可辨識每一層沉積層的邊界；第二處則是位於槽溝東牆及南牆交界處，此處可以觀察到 Unit 6b 的青灰色砂質沉積物是擠穿 Unit 5 的黑色泥質礫層，並與 Unit 4 形成一個明顯的界面，界面上有因鐵質而氧化的橘黃色物質，此物質是向上逐漸擴散的。

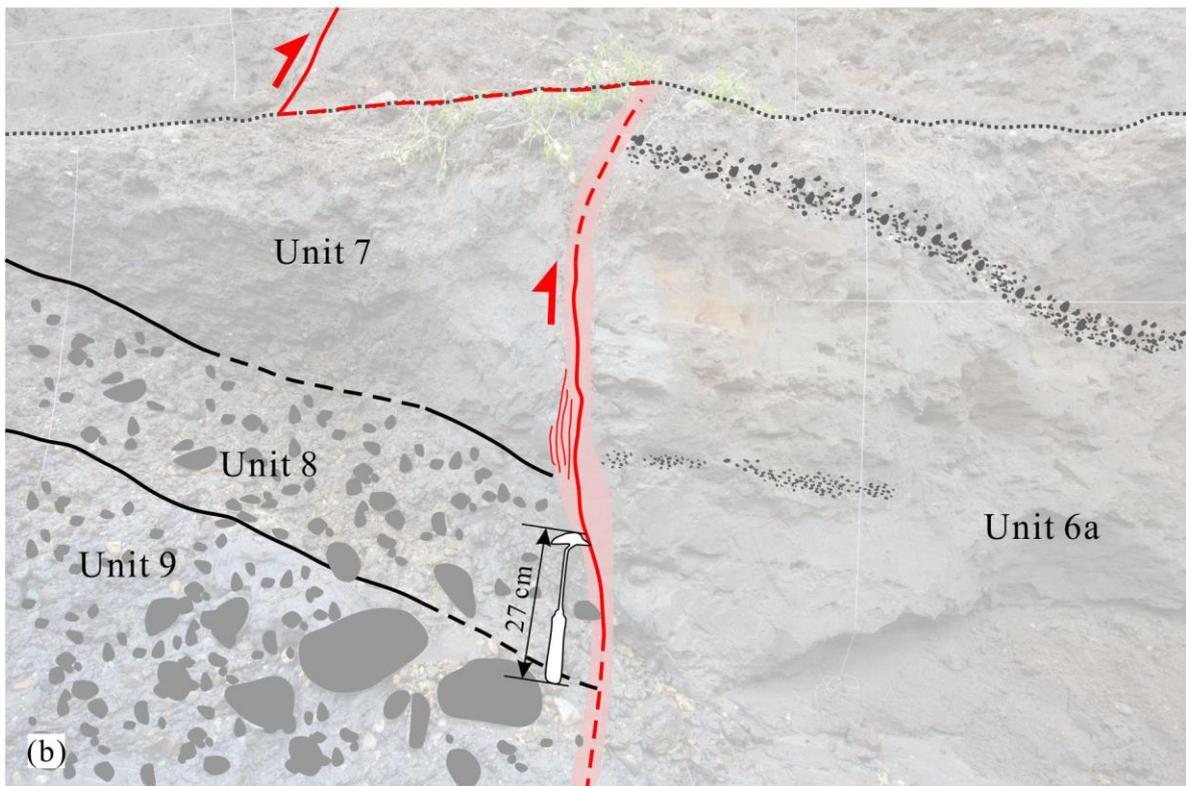


圖 60 槽溝西牆的主斷層露頭。(a)本照片攝於 1 號槽溝西牆(b)主斷層面附近有剪切面的分佈(紅色細線)，而由於斷層走向未與槽溝方向垂直，因此從照片上出現主斷層錯開的情況，實際上仍為同一個斷層面。

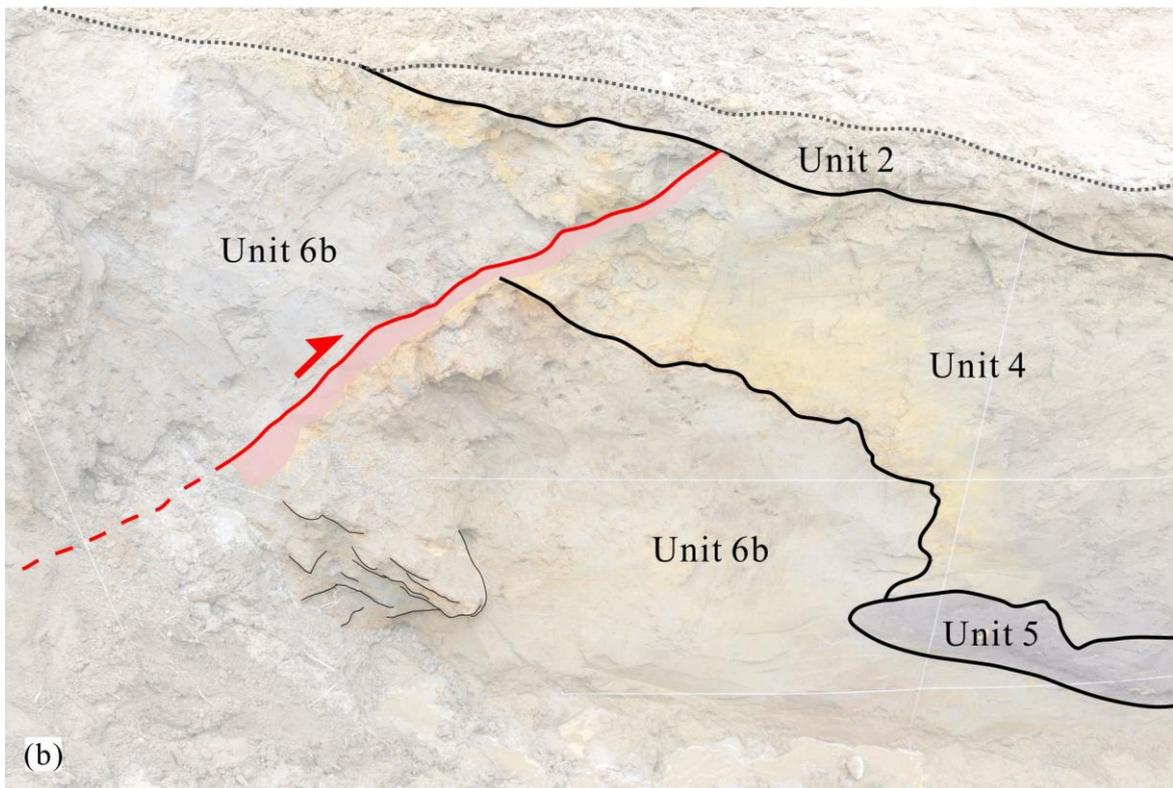


圖 61 槽溝西牆的分支斷層露頭。(a)本照片攝於 1 號槽溝西牆(b)分支斷層並未截穿 Unit 2，淺紅色範圍為較為泥質的斷層帶，寬度約 15 公分。

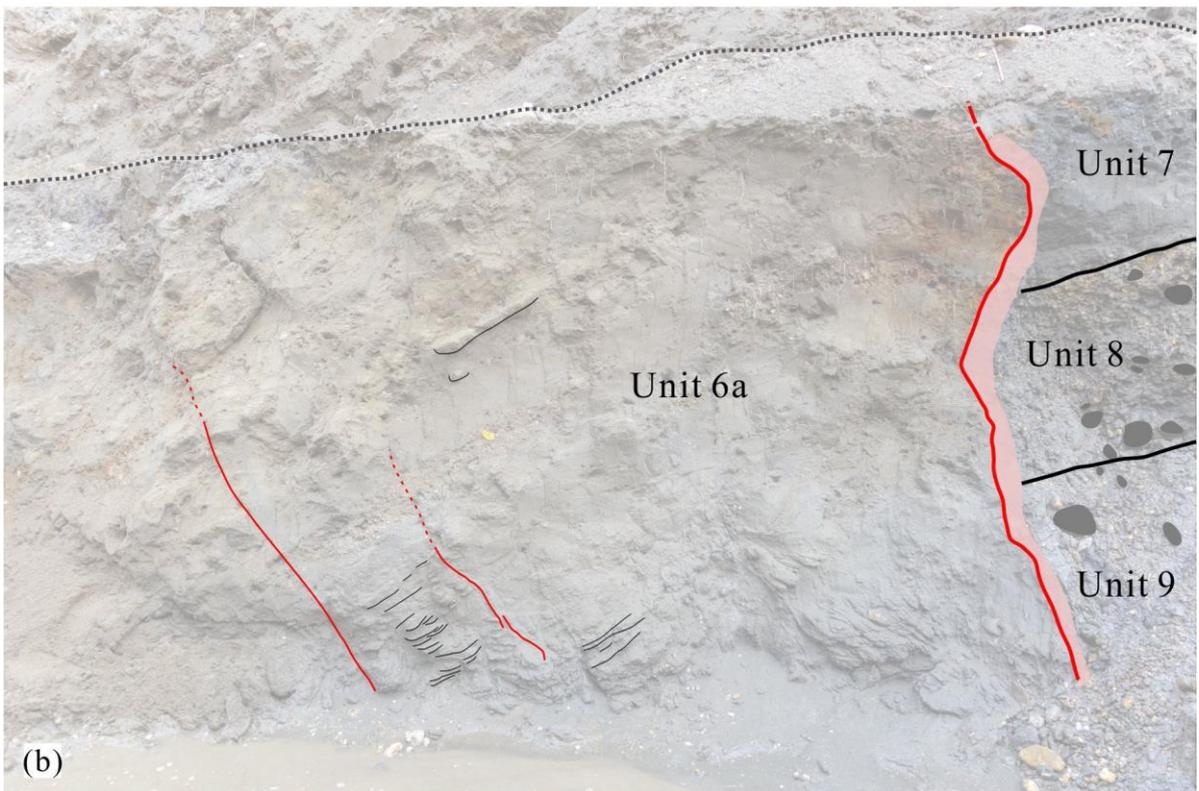


圖 62 槽溝東牆的主斷層與剪切面露頭。(a)本照片攝於東牆(b)主斷層以較粗的紅色實線表示，而位於主斷層北側的兩條剪切面則以較細的紅色實線表示，且在 Unit 6a 中可以看到鈣化作用形成硬度較高的結核。

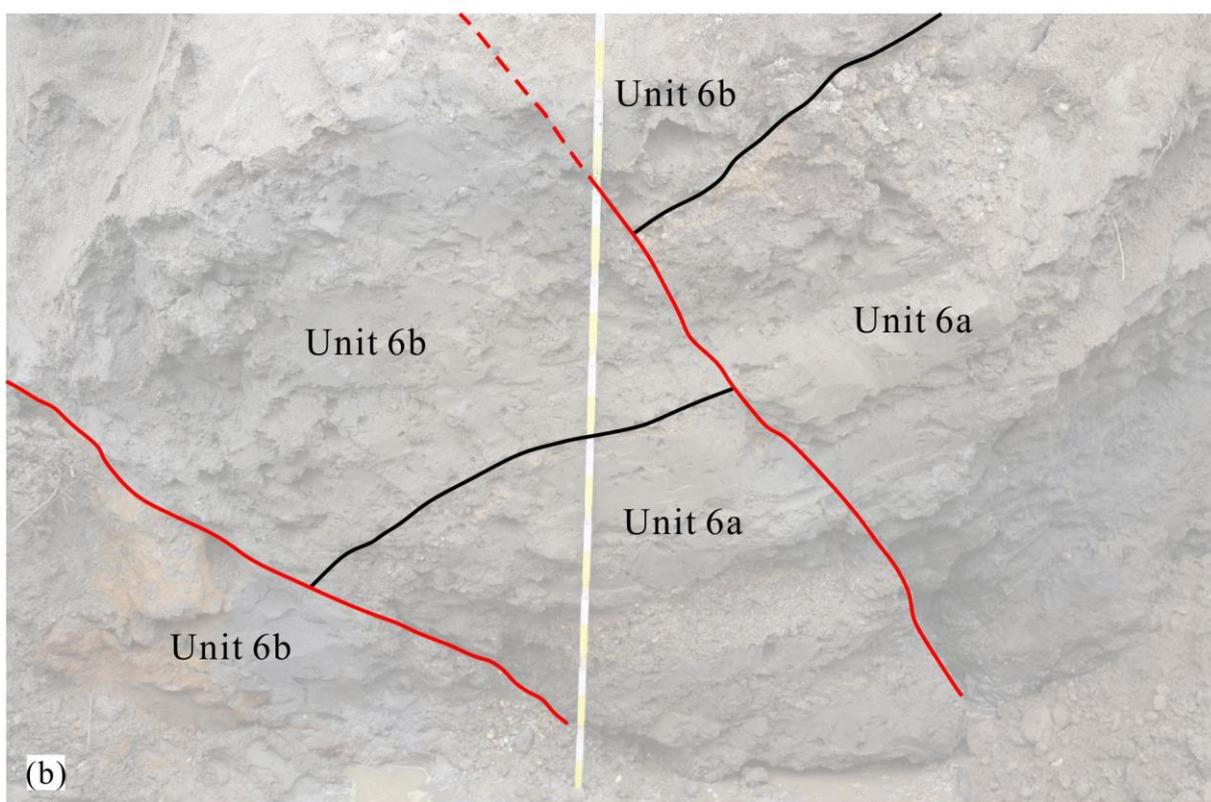


圖 63 槽溝東牆的分支斷層露頭。(a)本照片攝於東牆(b)兩條分支斷層皆截切 Unit 6，並以 70° 及 56° 向東傾。



圖 64 Unit 3a、Unit 3b、Unit 3c 向上逐漸褶曲之角度變化。沉積層角度變化從 30° 至 9° ，並且皆向北逐漸變緩至水平。

5-1-3 標本定年結果

為了瞭解所劃分的沉積層分層之上下沉積關係是否合理，需要利用定年的資料做控制，而 1b 槽溝中的 Unit 1 至 Unit 5 皆含有豐富的黑色焦炭物質與有機物質，此類材料適合進行定年實驗，因此 1b 槽溝中的 Unit 1 至 Unit 5 一共有 11 個標本送至美國 BETA 實驗室進行定年，6 個則送至台大實驗室進行定年。1a 槽溝中可定年的材料較少，本研究中於回填土及 Unit 8 個採集一個標本，而 1a 槽溝中多數定年資料則由陳文山老師提供。

定年樣本於 1 號槽溝中分佈於西牆及南牆，採樣位置如圖 65、圖 66 與圖 67 所示。定年結果所得到的測定年代需進行樹輪年代校正，每個標本的編號、測定年代、校正年代及定年材料如表 4 及表 5 所示。定年實驗採用 AMS 法，實驗所得的測定年代將取 95.4%(兩個標準差內)的區間進行校正，使用的校正曲線為 INTCAL13(Reimer et al., 2013)，校正後的年代區間將以主要的百分比峰值區間作為代表年代。各標本的測定結果圖請參照附錄一，測定年代中所使用「pMC」則是用於表示測定年代於 1950 年之後，碳含量所佔之百分比。

定年結果顯示，1b 槽溝中除了標本編號 20180827-19、20180827-30、20180829-54 及 20180829-51 所測得的年代外，其餘標本的定年結果皆可以符合我們所定義的沉積層層序，顯示出此定年結果的合理性，並說明 Unit 1 到 Unit 5 的沉積年代約從現今至 4000 年前，Unit 6 到 Unit 8 的年代則約從 5400 年前至 6200 年前。而編號 20180829-54 的年代老於其他層年代可能原因為沉積過程中再次堆積而使其年代老於沉積層實際堆積年代，編號 20180827-19、20180827-30 及 20180829-51 的年代則是由於採到現生植物而出現年輕於 1950 的年代。

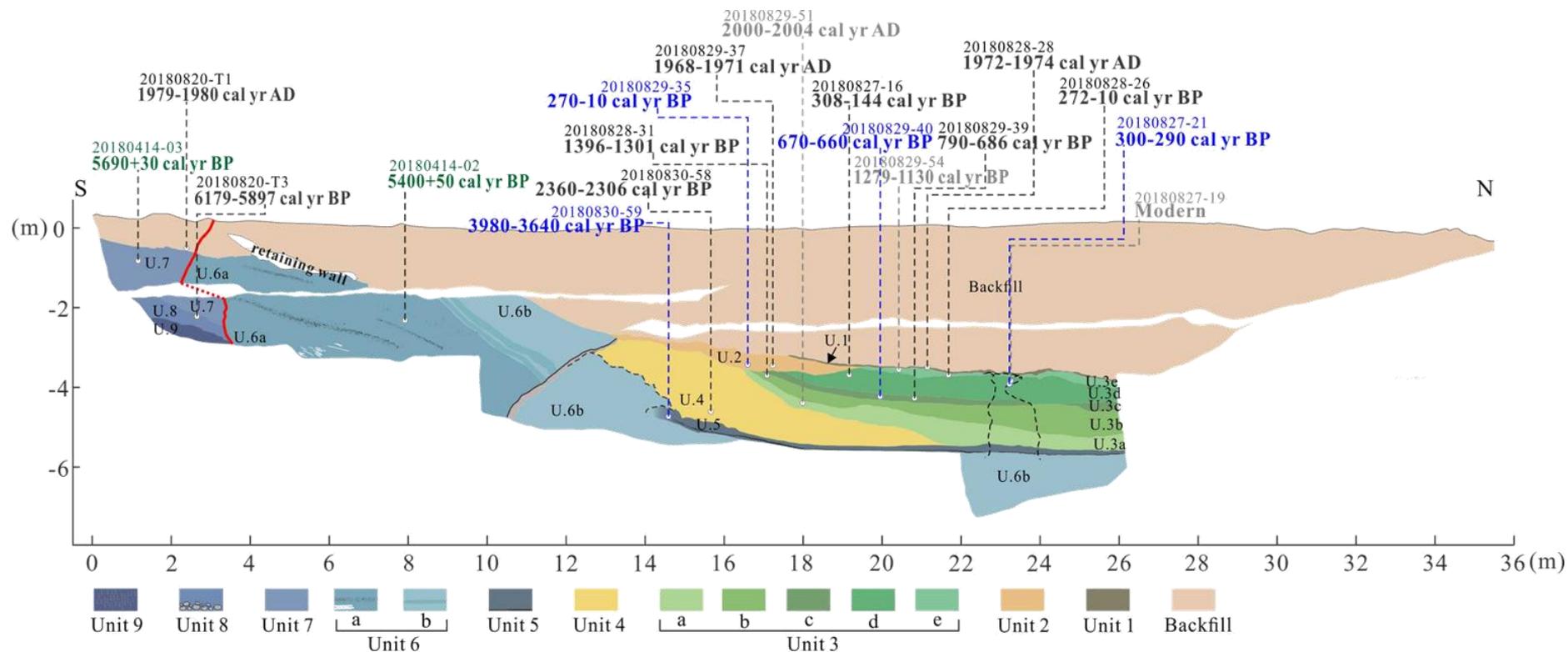


圖 65 1 號槽溝西牆定年標本編號與定年結果。黑色文字標示的標本為 BETA 實驗室定年結果，藍色文字標示的標本為台大實驗室定年結果，綠色文字標示的標本為陳文山教授提供之定年結果，灰色文字標示的標本因定年結果較不合理而不採用。

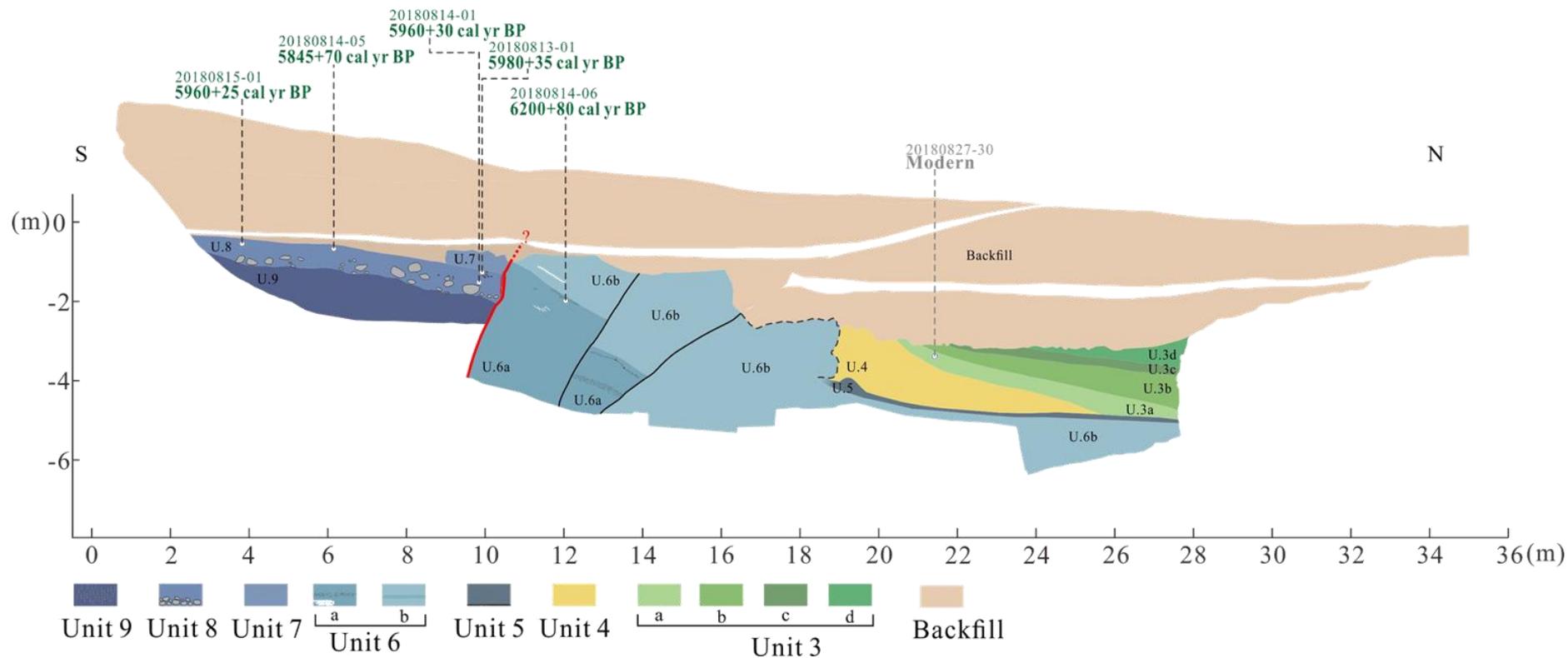


圖 66 1 號槽溝東牆定年標本編號與定年結果。綠色文字標示的標本為陳文山教授提供之定年結果，灰色文字標示的標本因定年結果較不合理而不採用。

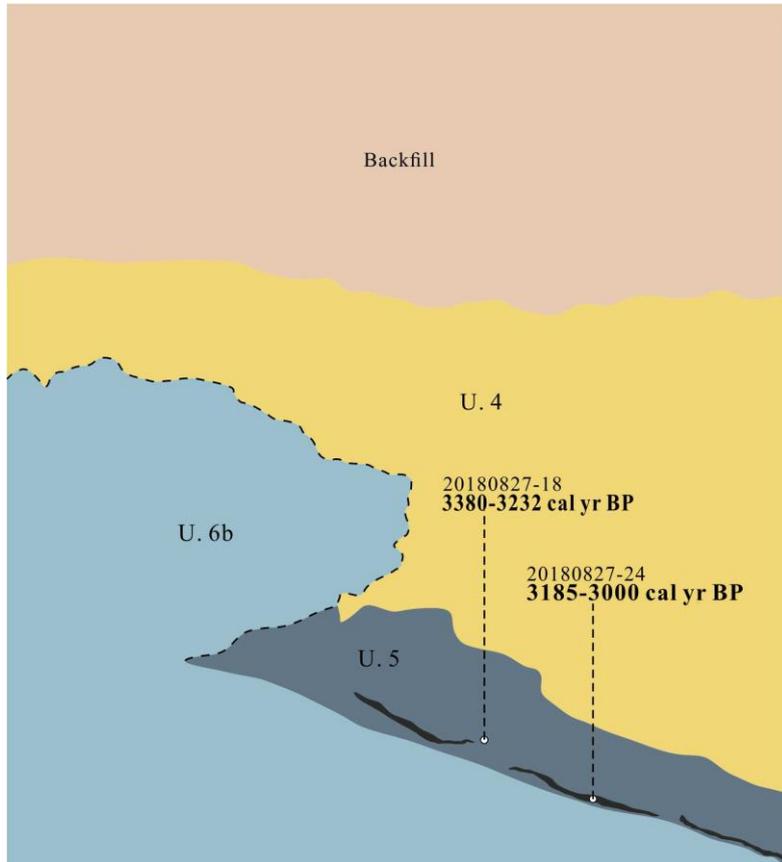


圖 67 1 號槽溝南牆定年標本編號與定年結果。此剖面的兩個標本皆採於 Unit 5 中，其中，編號 20180827-24 是採樣於本層中的黑色泥質碳層。

表 4 1b 槽溝標本年代資訊

	沉積層	標本編號	¹⁴ C 測定年代(BP*/pMC**)	可能校正年代範圍	樣本物質	備註
1	Unit 1	20180828-28	142.94±0.53 pMC	Post BP (1972-1974 AD)	焦炭	-
2	Unit 2	20180829-37	153.84±0.57 pMC	Post BP (1968-1971 AD)	焦炭	-
3		20180829-35	149±1 BP	272-10 cal BP	碳屑	NTUAMS***
4	Unit 3e	20180828-26	120±30 BP	272-10 cal BP	焦炭	-
5		20180829-54	1640±30 BP	1276-1130 cal BP	貝殼	-
6	Unit 3d	20180827-16	220±30 BP	308-144 cal BP	焦炭	-
7		20180827-19	Modern	Post BP	碳屑	NTUAMS
8		20180827-21	238±1 BP	300-290 cal BP	碳屑	NTUAMS
9	Unit 3c	20180829-39	830±30 BP	790-686 cal BP	焦炭	-
10		20180829-40	689±5 BP	670-660 cal BP	碳屑	NTUAMS
11	Unit 3b	20180828-31	1460±30 BP	1396-1301 cal BP	有機物	-
12	Unit 3a	20180829-51	108.02±0.4 pMC	Post BP (2000-2004 AD)	植物	-
13		20180828-30	Modern	Post BP	碳屑	NTUAMS

14	Unit 4	20180830-58	2310±30 BP	2360-2306 cal BP	有機物	-
15	Unit 5	20180827-24	2950±30 BP	3185-3000 cal BP	有機物	位於南牆
16		20180827-18	3100±30 BP	3380-3232 cal BP	有機物	位於南牆
17		20180830-59	3540±65 BP	3980-3640 cal BP	土壤	NTUAMS

*BP：以西元 1950 年為基準，標本年代早於 1950 年所使用的年代單位。

**pMC(percent Modern Carbon)：西元 1950 年後的標本年代所含碳之百分比。

***NTUAMS：由台大加速器質譜實驗室測定。

表 5 1a 槽溝標本年代資訊

	沉積層	標本編號	¹⁴ C 測定年代(BP*/pMC**)	可能校正年代範圍	樣本物質	備註
1	Backfill	20180820-T1	128.27±0.48 pMC	Post BP (1979-1980 AD)	木頭	-
2	Unit 6a	20180414-02	-	5400+50 cal BP	-	陳文山教授 提供
3		20180814-06	-	6200+80 cal BP	-	陳文山教授 提供
4	Unit 7	20180414-03	-	5690+30 cal BP	-	陳文山教授 提供
5	Unit 8	20180820-T3	5730±30 BP	6179-5897 cal BP	貝殼	-
6		20180815-01	-	5960+25 cal BP	-	陳文山教授 提供
7		20180814-05	-	5845+70 cal BP	-	陳文山教授 提供
8		20180814-01	-	5960+30 cal BP	-	陳文山教授 提供
9		20180813-01	-	5980+35 cal BP	-	陳文山教授 提供

*BP：以西元 1950 年為基準，標本年代早於 1950 年所使用的年代單位。

**pMC(percent Modern Carbon)：西元 1950 年後的標本年代所含碳之百分比。

5-2 2 號槽溝

2 號槽溝橫跨 2018 花蓮地震破裂跡，並與破裂跡呈 90° 相交(圖 68)，槽溝方向為西北-東南向，剖面長度約 20 米，深度約 4 米，槽溝雖開挖兩階，由於已經觸及地下水面，故第二階能出露的部分有限，另外在開挖過程中發現破裂跡下方為 L 型的擋土牆(圖 69)，擋土牆本身材料為巨大礫石，而小顆的礫石填充其縫隙中，擋土牆以西皆為人工回填土，其材料主要為黃土夾大小不一且形狀不規則的礫石，因此破裂跡以西的 2 號槽溝皆為回填土，而破裂跡以東出露的部分十分有限，主要以海相的砂層為主，偶夾薄泥層及薄礫石層。槽溝分為南牆北牆及東牆，南牆與北牆正攝影像如圖 70 所示，東牆則以照片呈現(圖 71)。接下來將說明 2 號槽溝牆面出露的沉積層及構造，以及樣本定年結果。



圖 68 2 號槽溝橫跨 2018 花蓮地震地表破裂跡

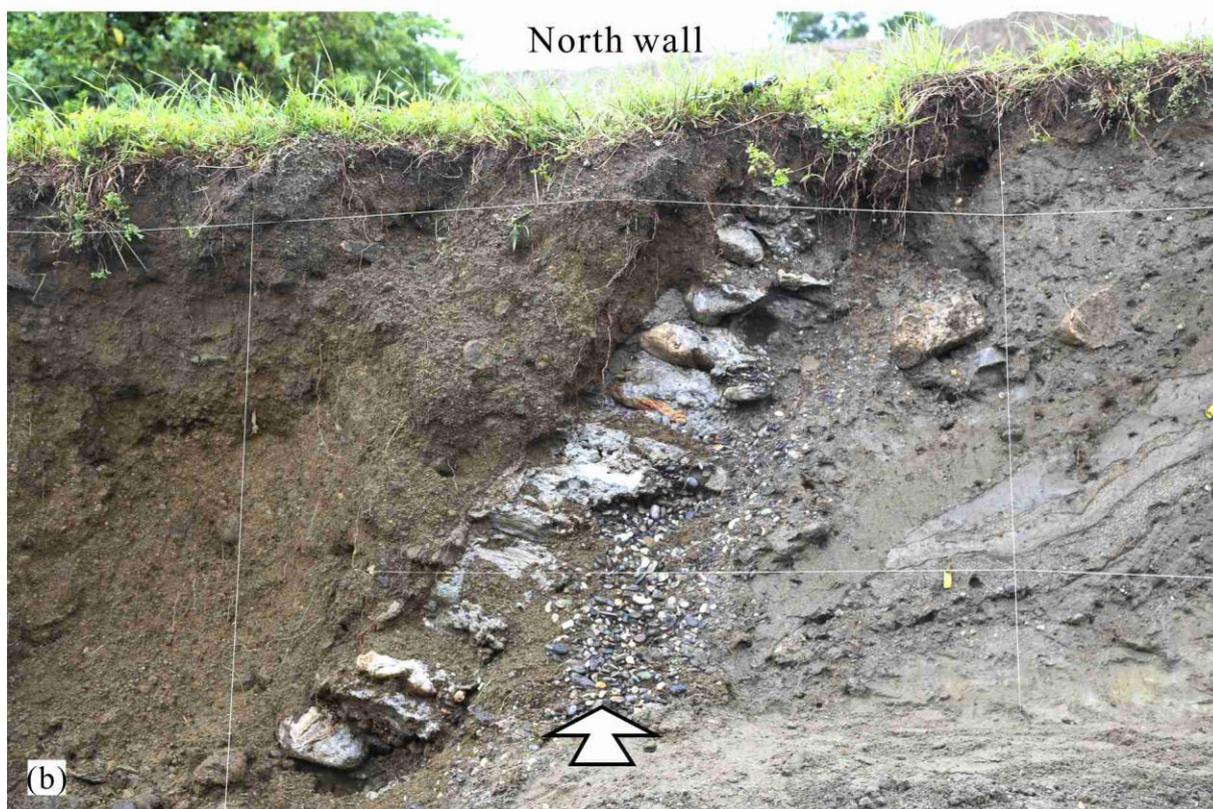


圖 69 埋於 2 號槽溝內的擋土牆。(a)槽溝剖面出露擋土牆，底部亦可看到黑色堅硬材質的擋土牆底部(b)擋土牆材料為以西為回填土，東側為沉積層。

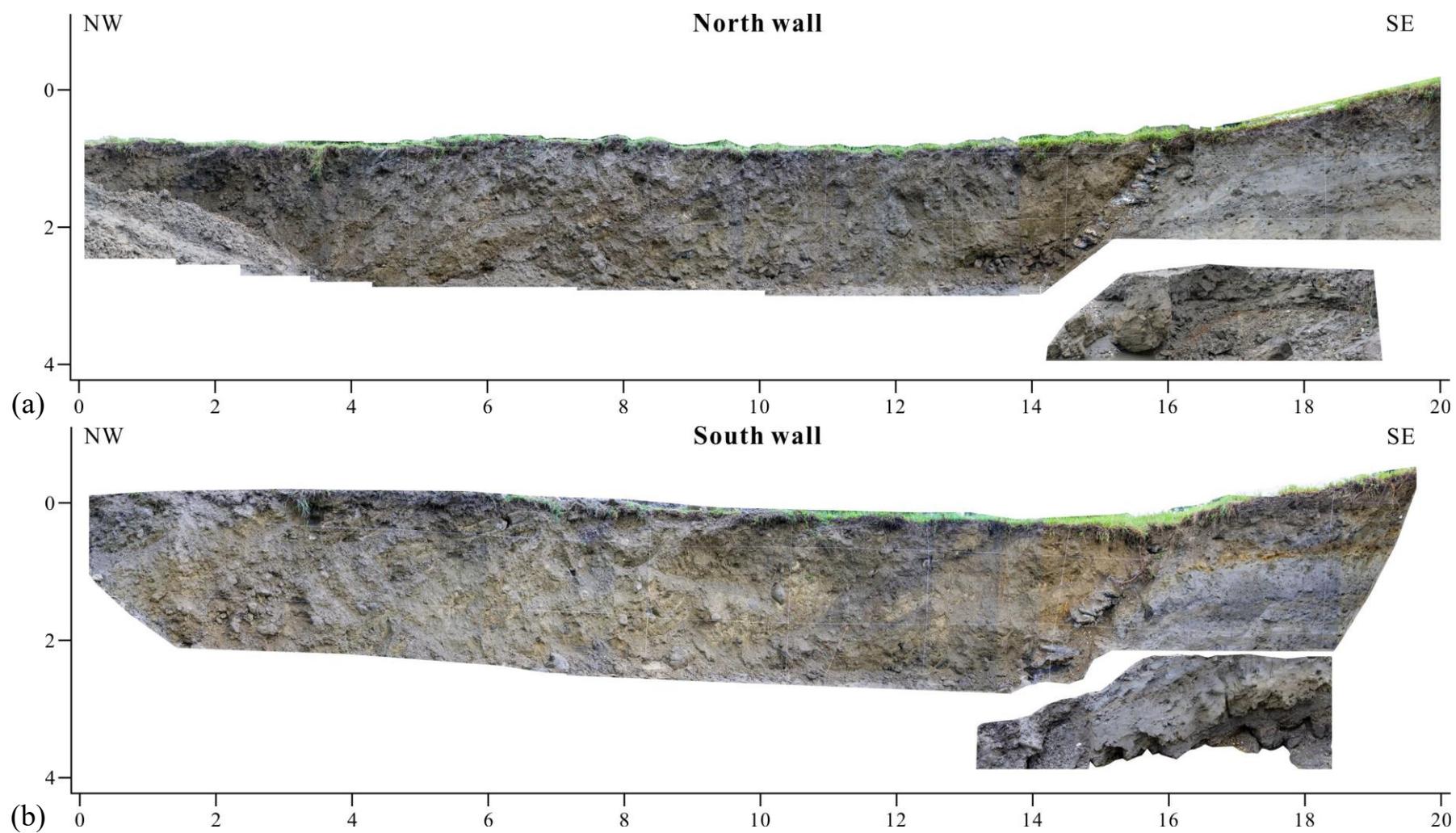


圖 70 2 號槽溝正攝影像圖。(a)槽溝北牆(b)槽溝南牆(鏡像反射)。



圖 71 2 號槽溝東牆剖面

5-2-1 沉積層與構造描述

2 號槽溝的沉積層主要出露破裂跡東側的部分，最上部覆蓋的回填土厚度約 0.8 米，整體以淘選度良好的砂層為主，粒徑大小主要為中砂，偶夾透鏡狀粗砂體、薄礫石層或是青灰色薄泥層，解釋剖面如圖 72 所呈現。粗砂層或礫石層間常含有貝殼碎屑，說明當時沉積環境為海相沉積，而礫石層或泥層的厚度約 5 至 15 公分不等，且因延續性不佳而會逐漸往側向變薄甚至尖滅。

從槽溝的南牆或北牆剖面可以觀察到所有沉積層皆向西緩傾斜約 9° ，東牆則可以看到沉積層向南傾約 7° ，因此可以推估層面位態約 $N17^\circ W/11^\circ SW$ 。從南牆及北牆剖面皆可以觀察到靠近擋土牆的沉積層傾角會突然變陡(圖 73)，推測可能原因為 2018 花蓮地震發生後，造成此處因相對左移而出現雁行的破裂跡，並使得近破裂跡下方的擋土牆四周出現空隙，因此靠近擋土牆面的沉積層出現陷落的情況。

與 1 號槽溝所出露的沉積層進行岩性對比後，此槽溝的沉積物組成與 1 號槽溝中的 Unit 6 較為相似，皆以海相的中砂質為主並夾粗砂層或礫石層，且富含貝殼碎屑，而根據推算出的沉積層傾角約為 11° 並向西南傾，若將 2 號槽溝出露的沉積層面延伸至 1 號槽溝，層面的高度將高於 1 號槽溝的地表面，而在 1 號槽溝中主斷層上盤並未觀察到與其相近的沉積層，說明 1 號槽溝主斷層上盤的 Unit 6 已被侵蝕，但於 2 號槽溝仍有出露。

構造的部分，2 號槽溝的南牆、北牆皆可以觀察到數條正移斷層，錯距最大約 15 公分，南牆可以看到 4 條斷層(圖 74)，其中 3 條往東南方傾，傾角為 30° 至 81° ，另一條則以 60° 向西傾，向下延伸傾角逐漸變緩，北牆則可看到兩條正移斷層(圖 75)，剖面上的視傾角為 40° 與 55° 向東南傾，錯距皆不到 10 公分。這些正移斷層可能形成的機制推測與主斷層活動有關，主斷

層上盤抬升時，上盤的沉積物因側向壓力減少而出現正移斷層(圖 76)，這些正移斷層並未延伸至最上部的回填土層，說明並未切穿地表。

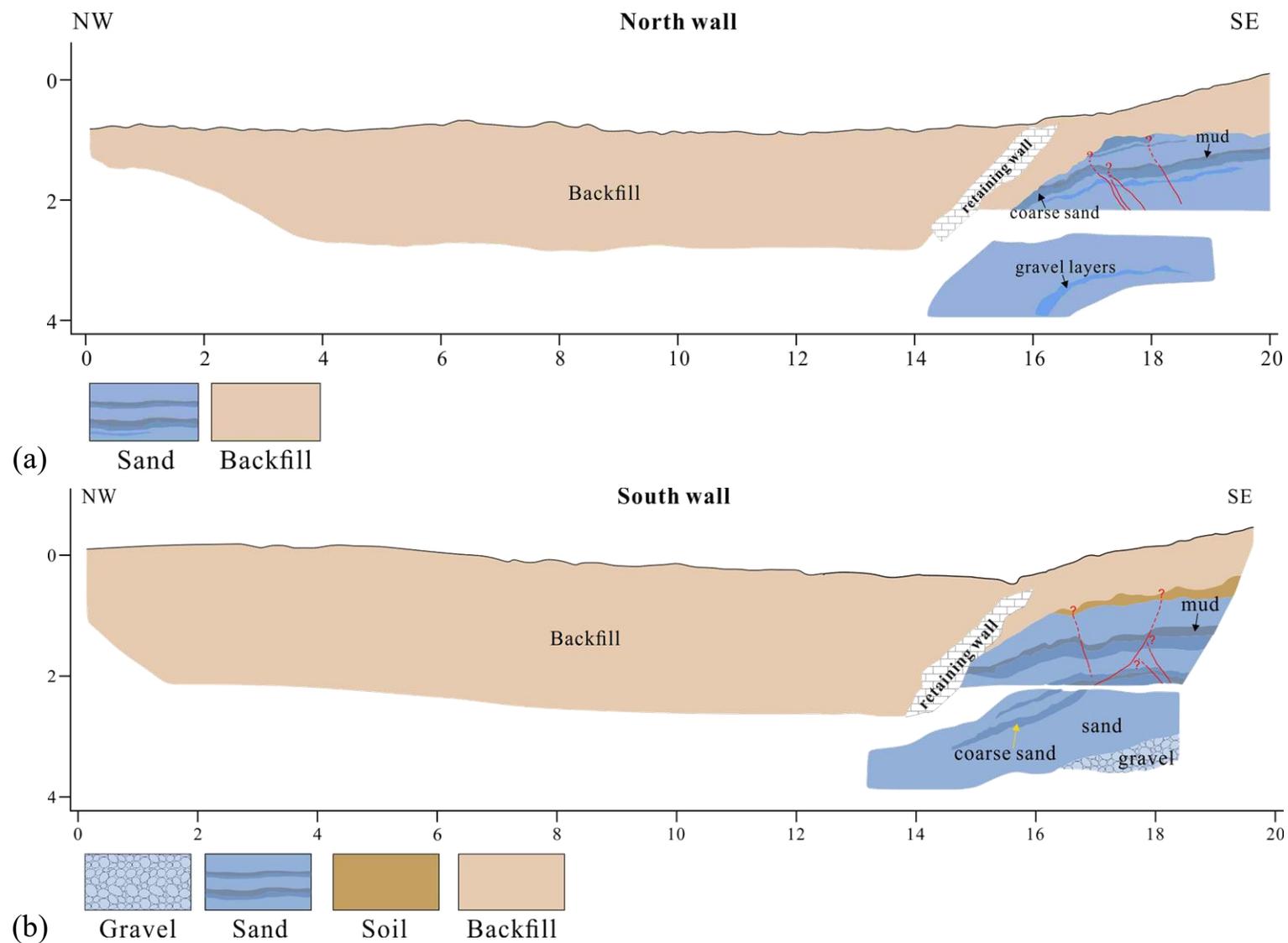


圖 72 2 號槽溝北牆與南牆解釋圖。(a)北牆剖面(b)南牆剖面(鏡像反射)。



圖 73 近擋土牆之陷落沉積層。(a)北牆剖面(b)南牆剖面。

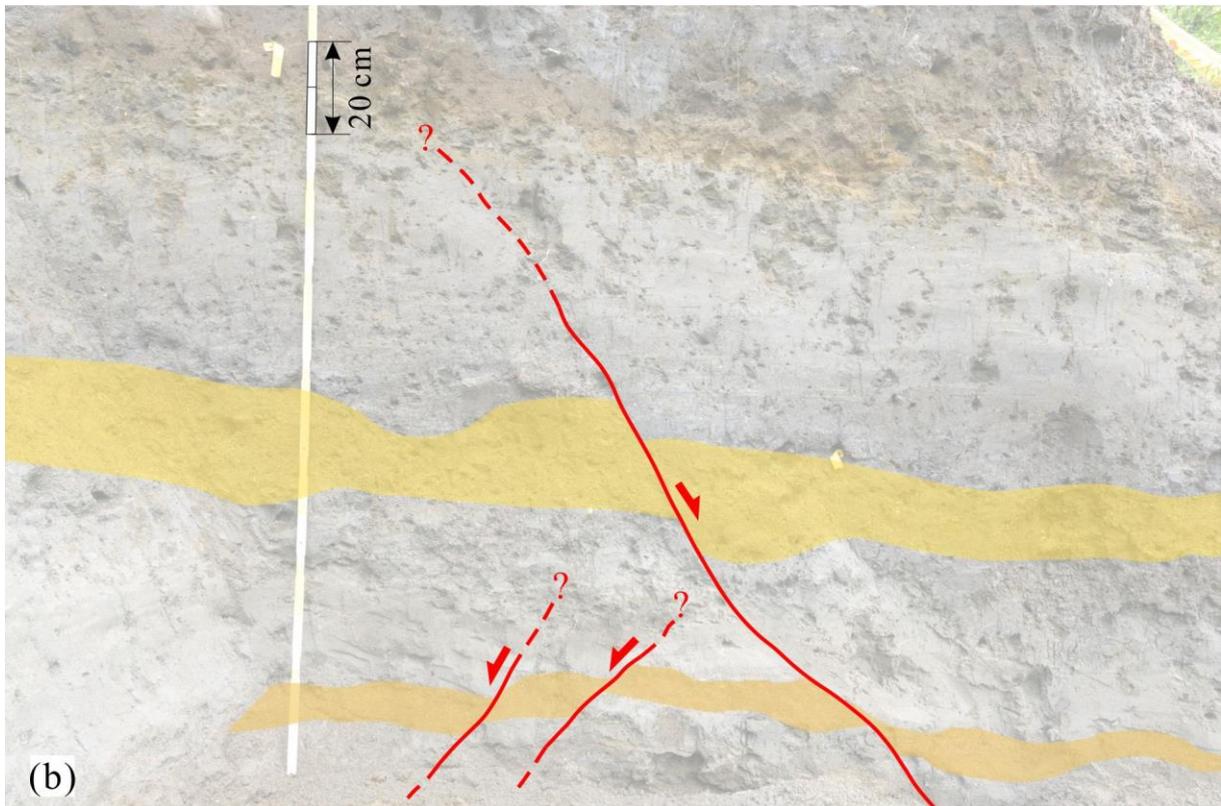
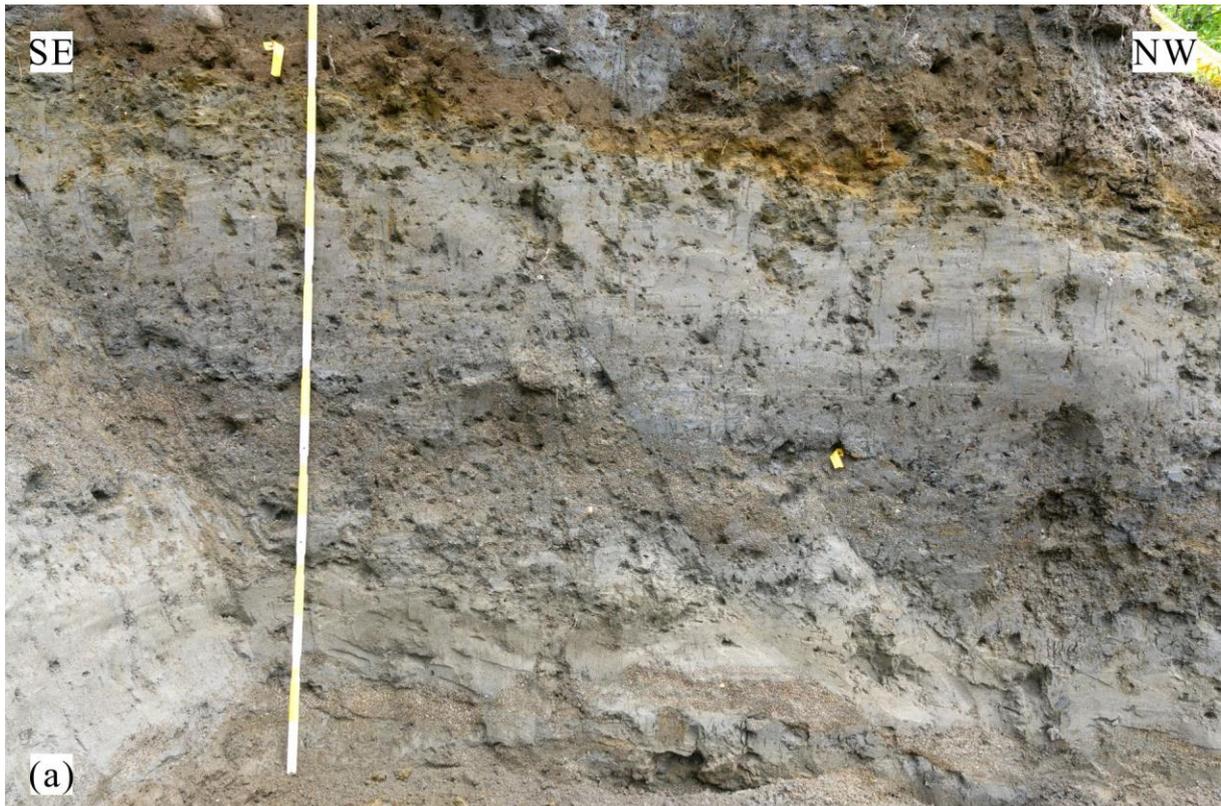


圖 74 2 號槽溝南牆剖面的正移斷層。(a)本照片攝於南牆(b)其中一條正移斷層傾斜方向與另外兩條相反，最大錯距為 15 公分。

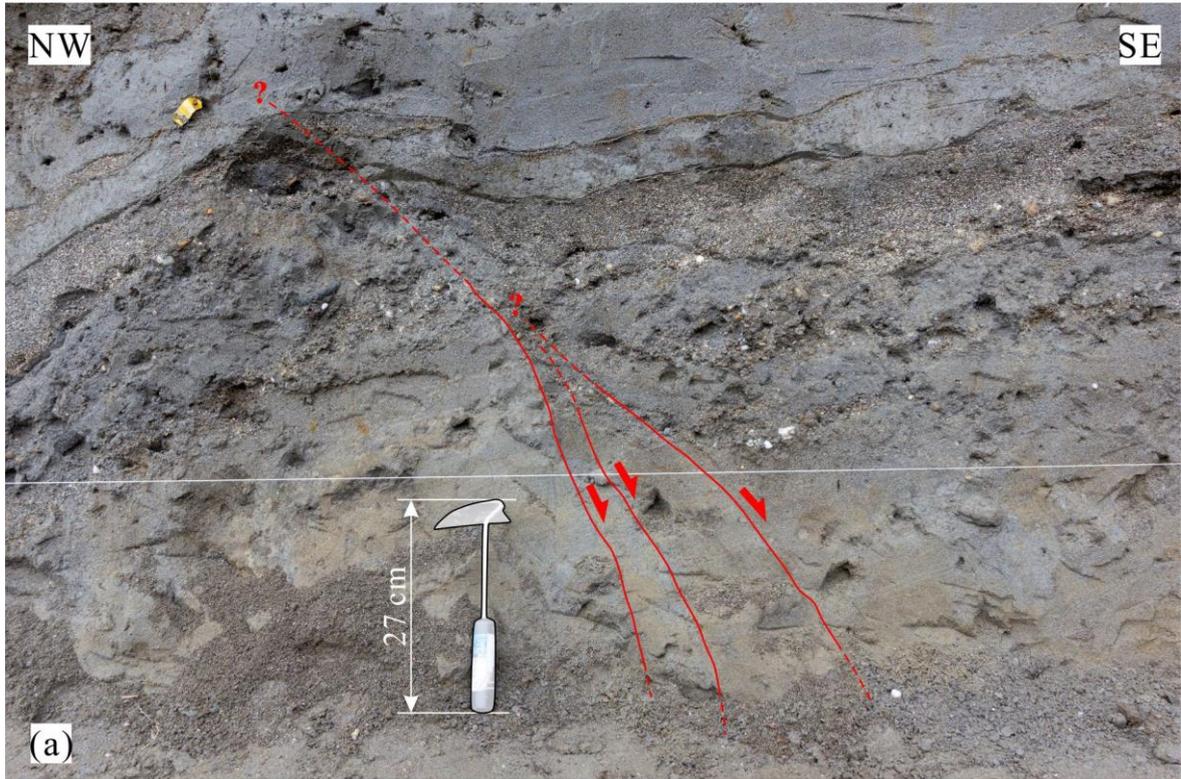


圖 75 2 號槽溝北牆剖面的正移斷層。(a)照片中三條斷層似乎合併成一條，其中一條斷層的錯距僅 4 公分，其餘則無法判斷(b)照片中的粗砂層有被錯移，錯距約 8-9 公分。

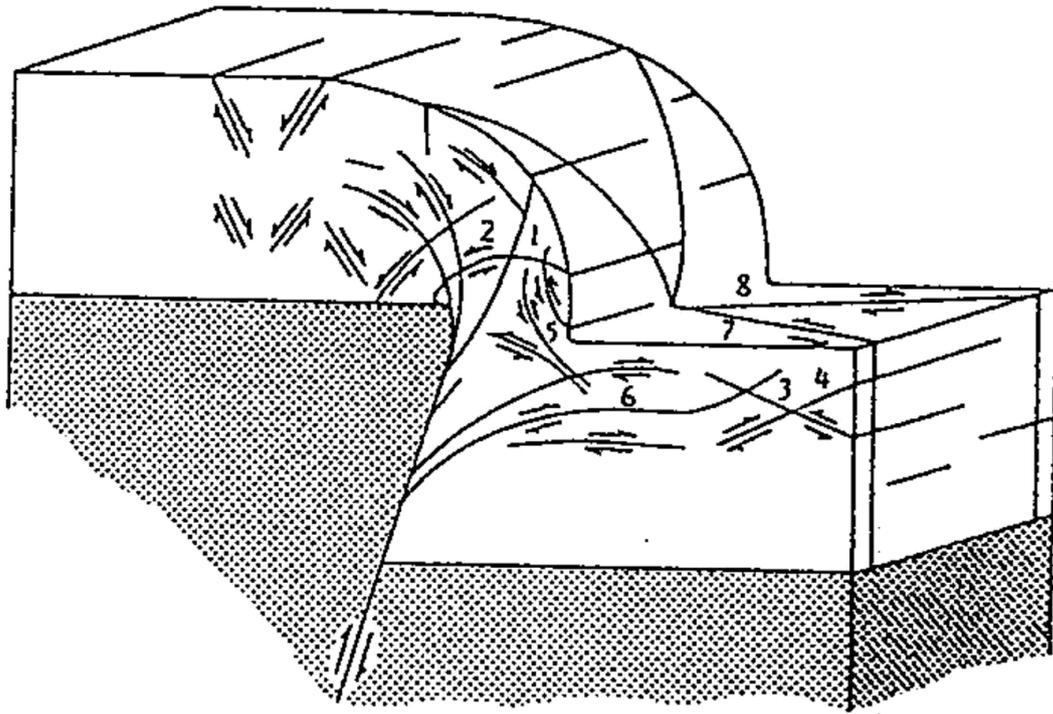


圖 76 小型正移斷層於逆斷層上盤的形成機制(after Ameen, 1990)

5-2-2 標本定年結果

2 號槽溝一共有 2 個標本，皆位於東牆，標本的編號、測定年代、校正年代及定年材料如表 6 所示，採樣位置如圖 77 所示，標本皆送至美國 BETA 實驗室進行 C^{14} 定年， C^{14} 測定方法則是採用 AMS 定年法，實驗所得的測定年代將取 95.4%(兩個標準差內)的區間進行校正，使用的校正曲線為 INTCAL13(Reimer et al., 2013)，校正後的年代區間將以主要的百分比峰值區間作為代表年代。測定結果圖請參照附錄一。

編號 20180829-32 的標本測定出的年代遠老於本研究中出露最老的沉積層，然而從採樣位置間的關係判斷，本標本應較編號 20180827-08 年輕，故推測此標本定年結果並不合理，標本物質可能經過再次沉積而沉積於較為年輕的沉積層中。而編號 20180827-08 的定年結果則說明 2 號槽溝出露的沉積層較 1 號槽溝中的 Unit 6 年輕，但沉積環境依然屬於海相環境，與 1 號槽溝 3000 年前的沉積環境不同，顯示兩個槽溝在同時期沉積環境有差異，或是採樣標本之來源並非現地沉積。

表 6 2 號槽溝標本定年資訊

	標本編號	¹⁴ C 測定年代(BP*)	可能校正年代範圍	樣本物質
1	20180827-08	2840±60 BP	3082-2837 cal BP	焦炭
2	20180829-32	18550±70 BP	22588-22273 cal BP	焦炭

*BP：以西元 1950 年為基準，標本年代早於 1950 年所使用的年代單位。



圖 77 2 號槽溝標本採樣位置與定年結果

5-3 鑽井岩心描述

本研究一共有 4 口鑽井，編號 BH-02 位於地表破裂跡東側，高程為 18.6 米，編號 BH-03 與 BH-04 則位於破裂跡西側，高程為 17.9 米及 17.2 米，此三口井的連線與破裂跡相垂直，而與 2 號槽溝長邊平行。編號 BH-01 則位於 1 號槽溝旁，高程為 17.2 米。鑽井的結果將與 2 號槽溝的剖面合併解釋，主要目的為透過岩性對比來推算斷層的垂直錯移量。

5-3-1 岩心分層

編號 BH-01、BH-03 與 BH-04 的井深皆為 30 米，此三口井的沉積物組成相當接近，根據沉積物粒徑大小的變化大致可以區分成 3 層，由年輕至老為：中砂層及粗砂層、砂層夾薄礫石層、礫石層。而編號 BH-02 的井深為 20 米，沉積物與其他三口井差異較大。岩心最上部皆為回填土，每口井的回填土厚度約 2 至 6 米。回填土中可發現樹根或是磚頭、塑膠等人造物。

中砂層及粗砂層在編號 BH-01、BH-03、BH-04 的岩心中皆有出現。本層在此三口井中的沉積物組成以海相的中砂層及粗砂層為主(圖 78)，粗砂層中常可發現貝殼碎片，此外也可發現部分砂層因鈣化作用膠結而較為堅硬(圖 79)。而在 BH-03 及 BH-04 中 11.5 至 12 米深的位置，沉積相突然轉變為粉砂質，說明沉積環境突然且短暫的改變，另外同樣在這兩口井大約 5 至 6 米深的位置皆出現同一黑色含碳泥層。本層於 BH-01、BH-03、BH-04 的厚度分別為 9.7 米、8.3 米、8.7 米。

砂層夾薄礫石層則同樣分布於 BH-01、BH-03、BH-04 的岩心中，本層以中砂層或粗砂層為主，偶夾薄礫石層或是數顆礫石(圖 80)，礫石皆為橢圓狀且無稜角，大小則從數毫米至 6 公分不等，基質支持的薄礫石層有出現部分的鈣化並膠結，故較為堅硬，基質成分為中砂質。本層於 BH-01、BH-03、BH-04 的厚度分別為 8.9 米、8.2 米、8.6 米。

位於 BH-01、BH-03、BH-04 岩心最底部的礫石層淘選度極差，為顆粒支持的礫石層(圖 81)，礫石大小最大可達 26 公分，平均則在 10 公分內，形狀則是圓礫及角礫狀皆可看到，礫石來源為變質岩，基質則是粗砂或極粗砂填充，並含有貝殼碎屑，部分區塊同樣因鈣化膠結作用而使岩心鑽取較完整。本層於 BH-01、BH-03、BH-04 的厚度分別為 8.8 米、8.3 米、7.2 米。此礫石層的組成成分變化大，由大小不等的礫石夾雜砂質及土壤，且位置靠近斷層，推測可能為斷層上盤崩落並堆積形成崩積層，屬於陸相沉積。

BH-02 的岩心可分成 3 層，岩心取樣率不佳，由於鑽取出的沉積物大多皆為礫石，而基質皆未能保留，不過仍有一些關鍵的岩心提供重要的資訊，得以跟另外三口岩心進行對比。1.6 至 4 米深的岩心為中砂，中間有部分出現已無基質的礫石；4.8 至 5 米深的位置出現完整礫石層，礫石大小為約 1-3 公分，基質為粗砂質(圖 82)，因此推測可與其他三口井的最底部的礫石層對比。深度 12.5 米處則出現直徑約 20 公分的巨礫，13.9 至 15.4 米出現深色泥質及粉砂質沉積物(圖 83)，夾有大小約數毫米至 3 公分大的礫石，且 14.4 米有一傾角 46° 的剪切面。

本研究中編號 BH-01、BH-02、BH-03 及 BH-04 岩心之個別岩心照片及分層描述收於附錄二中。

5-3-2 岩心對比

岩心中有部分沉積特徵能夠與 1 號槽溝對比。BH-03、BH-04 大約 5 至 6 米深的位置出現的黑色含碳泥層與 1 號槽溝中黑色含碳的 Unit 5 可能為同一層(圖 84)，高程也相當接近。而鑽井中海相的中砂層夾粗砂層或礫石層，且富含貝殼碎屑，與槽溝中 Unit 6 及 Unit 7 之沉積環境同屬海相環境，然而鑽井中出現許多鈣化並膠結的粗砂層，顯示與槽溝中的海相砂層仍有差異。淘選度差的礫石層偶夾巨礫，基質則為粗砂質並夾土壤，僅出現於鑽井中，並未於出露於槽溝中，根據其沉積特徵推論可能陸相沉積之崩積層。而 BH-02 最底部所出露含礫石的泥層與槽溝中出露最老的沉積層 Unit 9 相似，然而槽溝中出露的高程為 15 米左右，而 BH-02 所出露的高程為 4.7 至 5.9 米，兩處距離僅相差 30 米。

為了將 4 口井進行對比，將 2 號槽溝周圍的三口井相連後發現與槽溝長邊平行，並與破裂跡相垂直，因此將 4 口井投影至與 2 號槽溝長邊平行的剖面上。根據岩心判釋後所建立的分層，BH-02 於 4.8 至 5 米深鑽到的礫石層與另外三口井最底部的礫石層具有接近的沉積組成與特徵，說明此礫石層在 4 口井中皆出現。礫石層上界在 BH-02 中可能的高程為 13.9-14.6 米，而在剖面上最靠近上盤的 BH-01 中可能出露的高程為海平面以下 4 米，說明 BH-02 與 BH-01 之間有斷層通過，推測即為米崙斷層，並藉由此高程差可推算出礫石層垂直的錯移量約 17.9-18.6 米(圖 85)。根據上下盤鑽井所推算的垂直錯移量與兩井之間的水平距離為 7 米，藉由三角函數關係估算米崙斷層最低傾角角度，計算出的結果顯示斷層傾角至少為 69° 。



圖 78 岩心分層-中砂及粗砂層。此為 BH-03 中 8-12 米深的岩心照片，以海相的中砂層與粗砂層組成，粗砂層中富含貝殼碎屑，黃色箭頭所指為因鈣化作用並膠結而形成較為堅硬的部分。

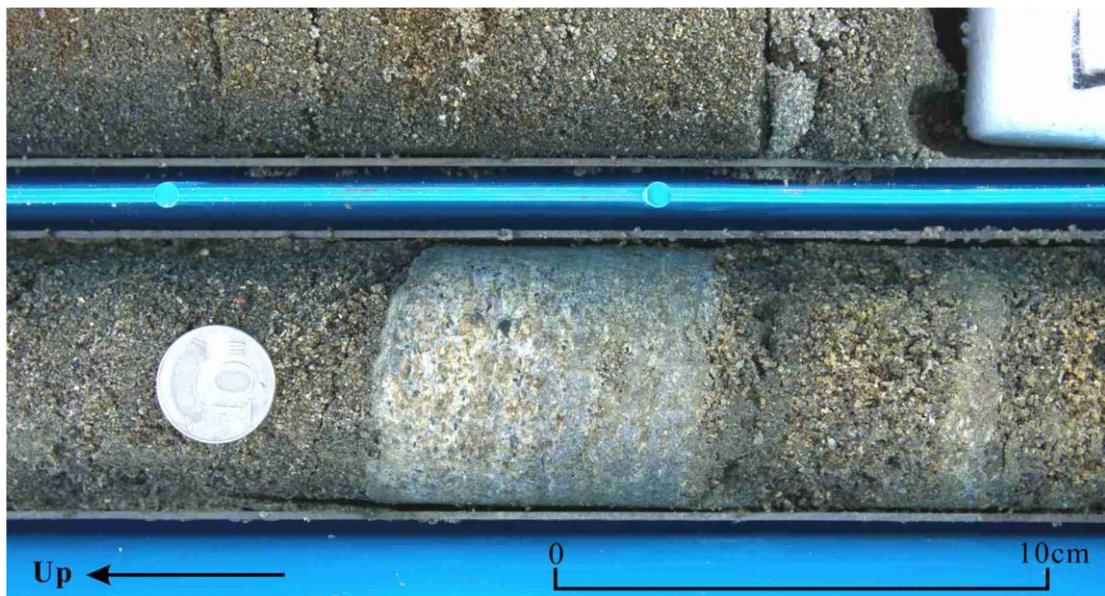


圖 79 鈣質膠結粗砂層。此為 BH-01 中 7.75-9 米的近照。



圖 80 岩心分層-中砂層夾薄礫石層。此為 BH-03 中 14-16 米深的岩心照片，為基質支持的礫石層，基質為中砂，礫石皆為橢圓狀且無稜角，大小則從數毫米至 6 公分不等。



圖 81 岩心分層-淘選度差之礫石層。(a)BH-03 中 24-28 米深的岩心照片，礫石大小差異極大，基質為粗砂質(b)BH-01 中 27.5-27.7 米深的近照，能清楚看到礫石層中的基質。



圖 82 BH-02 中 4.8-5 米深之淘選度差礫石層

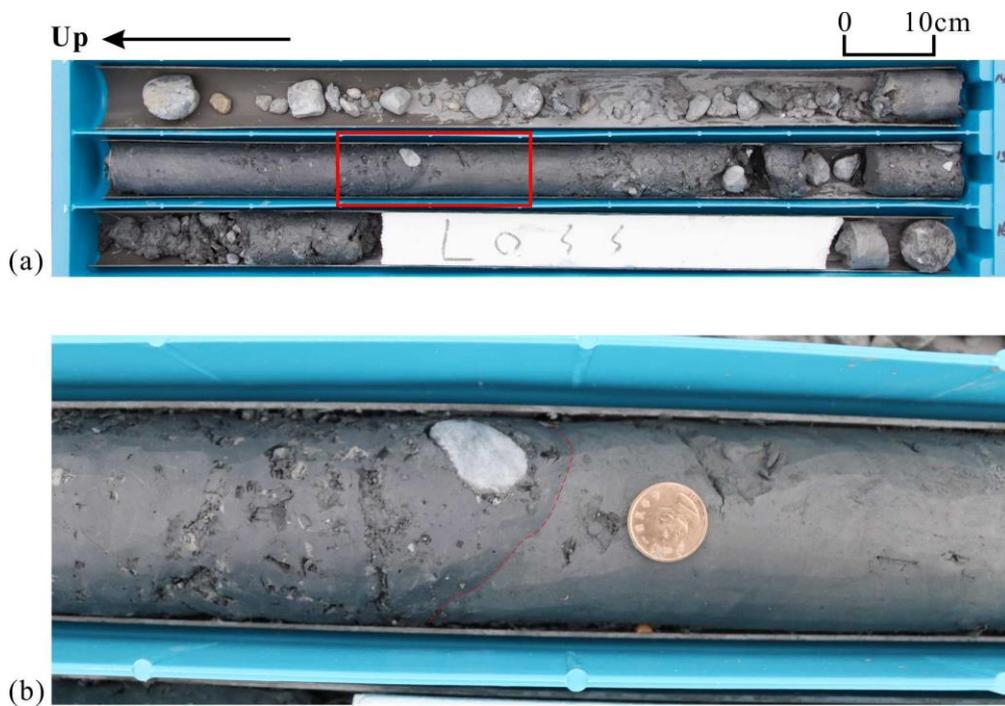


圖 83 BH-02 夾有礫石之深色泥質及粉砂質沉積物。(a)13-16 米深為泥質及粉砂質並夾有大小約數毫米至 3 公分大的礫石(b)為圖 a 中紅框處放大照，可以看到明顯的剪切面及岩性改變，剪切面角度為 46° 。

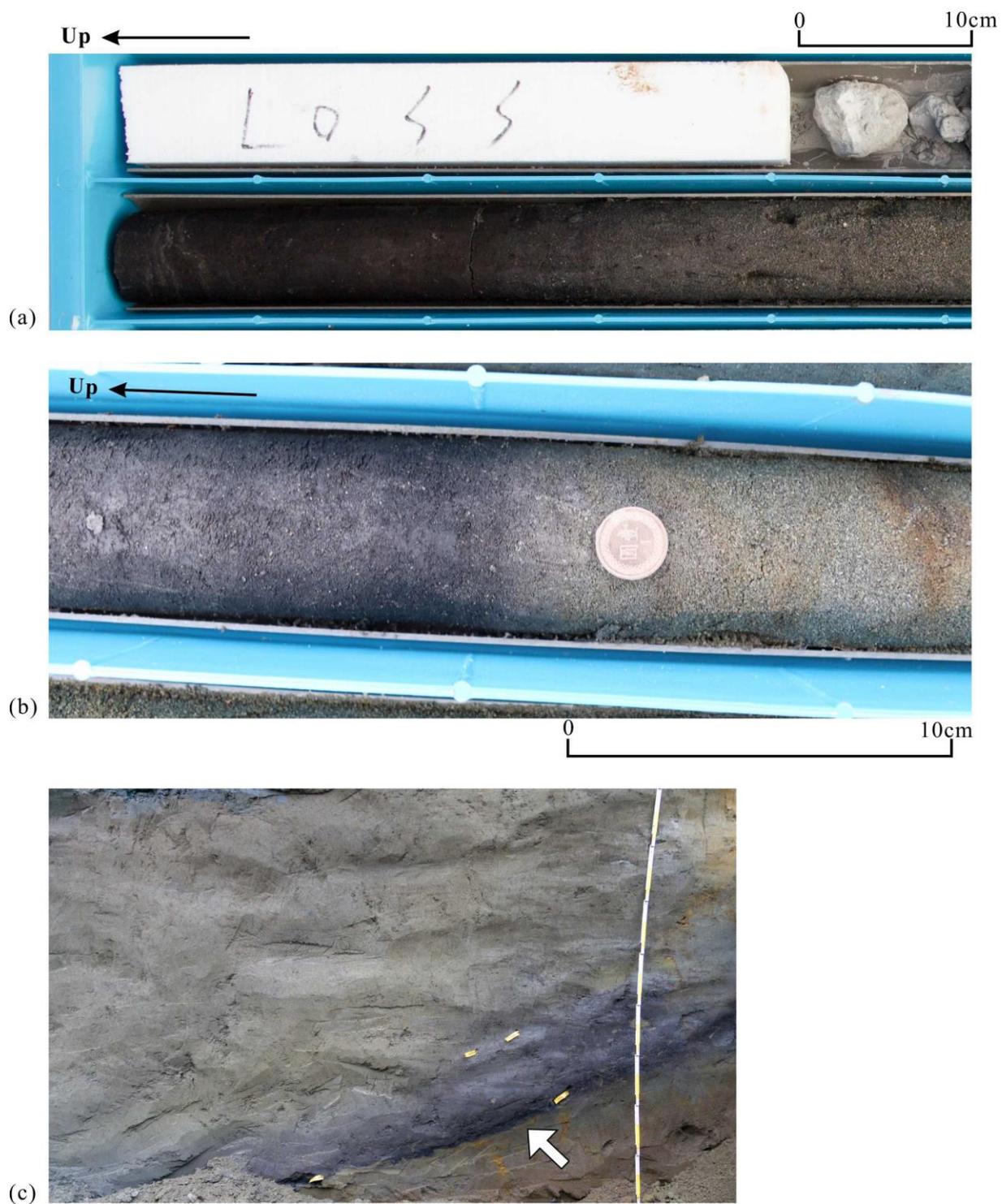


圖 84 BH-03 及 BH-04 中的黑色含碳泥層。(a)BH-04 中 6-6.5 米深位置(b) BH-03 中 5.3-5.5 米深位置。

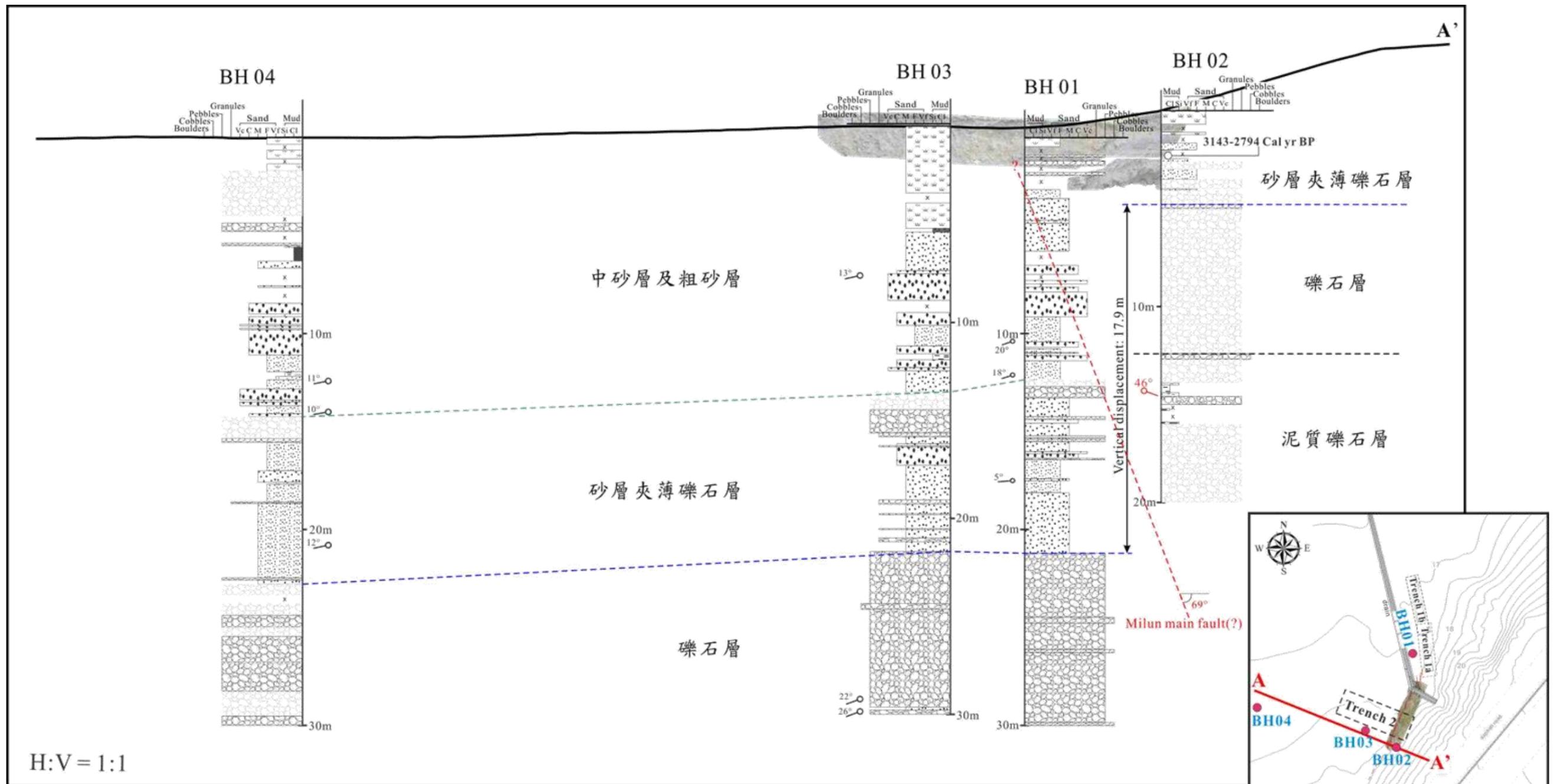


圖 85 跨米崙斷層之鑽井剖面與分層。將四口鑽井投影至 A-A'地形剖面上，右下角圖為 A-A'剖面方向。根據岩性的分層結果，BH-02 與 BH-01 間應存在一斷層(紅色虛線)，即可能為米崙斷層。從上下盤的礫石層高程差可知垂直錯移量為 17.9 米，而米崙斷層傾角至少為 69°。圖中呈現灰色半透明的岩性為已無基質僅剩礫石保留的礫石層。

5-4 古地震事件判斷依據

從 1 號槽溝出露的沉積層中，可觀察到部分沉積層特徵可能與地震的發生有關，因此本研究中將藉由這些特徵分析可能發生的古地震次數。地震的產生不僅造成地表出現破裂，亦可能導致土壤液化、崩塌及地下的沉積層出現褶曲。根據這些因地震產生的現象，並配合沉積層的定年結果，即可推斷古地震可能發生的年代。1 號槽溝中主要根據 3 種沉積特徵分析古地震事件：

1. 崩積楔形體：地震發生後，斷層上盤相對錯移至下盤之上，上盤物質崩落後堆積於斷層下盤，形成三角狀崩積體。槽溝中共兩層有楔形體的特徵，分別為 Unit 2 及 Unit 4，兩層皆位於分支斷層下盤，Unit 4 直接與斷層接觸，Unit 2 則蓋在斷層之上。Unit 2 的判斷依據為其沉積的形狀呈三角狀，且與 Unit 3 為交角不整合接觸關係，並在底部發現與 Unit 3 沉積物相似的黑色球狀砂體(圖 57)，而古地震可能發生的年代為 Unit 3e (Unit 3 中最年輕的沉積層)之後、Unit 2 之前；Unit 4 的判斷依據同樣是根據三角狀之沉積形狀，沉積物為不均質的泥質砂層，而古地震可能發生的年代為 Unit 5 之後、Unit 4 之前。
2. 液化現象：土壤液化是由於地震晃動的過程中，疏鬆的砂質因此重新堆疊而使得孔隙變小，孔隙中的水也被擠壓排出，液化現象通常在地下會形成一通道狀。1 號槽溝的東、西牆及南牆皆可觀察到 Unit 6b 的物質擠穿 Unit 5，並且與 Unit 5 及 Unit 4 形成明顯的邊界，邊界上還有一些氧化現象產生的橘黃色砂，雖然槽溝中所觀察到的並非是一通道的形貌，然而底部的物質沿著斷層面向上的現象推測仍與地震事件有關，而此現象的形成必定發生於 Unit 4 沉積之後，說明古地震可能發生的年代為 Unit 4 後。

3. 褶曲沉積層：Unit 3 中的生長地層(Unit 3a-c)在靠近分支斷層處的厚度逐漸變薄且傾角逐漸變陡，形成向上褶曲的沉積層(圖 64)，這樣的現象常見於近斷層處，通常是由於斷層活動造成上下盤的地層因斷層移動的拖拉而造成引曳。由於 Unit 3d 及 Unit 3e 的邊界並無看到褶曲的現象，故推測造成褶曲的古地震可能發生的年代應於 Unit 3c 與 Unit 3d 之間，然而實際上有幾次古地震發生於這段期間，導致沉積層形成現今所看到的褶曲並無法得知。

除了上述特徵所判斷出的古地震事件外，若有歷史紀錄記載著古地震所造成的地表破裂等現象，與米崙斷層有關聯，同樣可列入米崙斷層的古地震事件中，而至今所知的兩次古地震為 2018 年 2 月 6 日及 1951 年 10 月 22 日的地震。綜合上述的判斷古地震事件的特徵及歷史紀錄，並利用這些特徵將所繪製的槽溝剖面進行構造回復，即可推出槽溝中紀錄的古地震次數，再配合各沉積層的定年年代，即可推估古地震事件的年代，剖面回推的過程將於第六章中說明。

第六章 討論

6-1 古地震事件分析

綜合出露於兩個槽溝之各沉積層，可以將此區域的沉積層分成 9 個單元(圖 86)，由年輕至老為 Unit 1 至 Unit 9。

出露於分支斷層下盤的 Unit 1 至 Unit 4 主要為陸相沉積物，並包含因古地震所致的崩積楔形體及生長地層，其中 Unit 2 與 Unit 3 之接觸面為一侵蝕面；Unit 5 則可能為古湖泊或沼澤底部，富含有機質，出露於 1 號槽溝及 BH-03、BH-04 中，同樣位於斷層下盤位置，從 Unit 5 至 Unit 6 的沉積組成差異顯示沉積環境從海相轉變成陸相，推論可能曾發生一次劇烈的抬升使整個沉積環境轉變，可能發生年代即介於 Unit 5 至 Unit 6 間，亦即約 5500 至 4000 年前。

Unit 6 主要為海相的沉積物，出露於兩個槽溝中，根據沉積組合的不同可以區分成兩段，上部(Unit 6b)為中砂層夾粗砂層，下部(Unit 6a)則為中砂層夾薄礫石層，粗砂層及礫石層中常富含貝殼碎屑；1 號槽溝中的 Unit 7 因僅出露於主斷層上盤，層序上並無法判斷是否為連續的沉積，因此將其與 Unit 6 相區分，但由於兩個沉積單元的組成皆以海相砂組成，顯示沉積環境並無明顯變化，可能說明此段時間並無重大的地震事件致使環境出現變化。Unit 8 底部的巨礫與 Unit 9 呈現交角不整合關係，此現象亦可見於現今的七星潭海岸，此接觸關係可能的形成原因推測有以下三種：第一種為出露於海平面附近的米崙鼻礫岩上堆積了河流帶來大小不一的礫石形成礫灘；第二種為海嘯所帶來之礫石沉積於米崙鼻礫岩之上；第三種則為海水將出露於海平面附近的米崙鼻礫岩內的基質侵蝕後，僅存大顆的礫石保留在原地。

而槽溝剖面所觀察到的構造包含一條主斷層及兩條分支斷層，主斷層為本次地震主要的破裂面，分支斷層因有確實切穿 Unit 4，但尚未切穿 Unit

2，故推測其最後一次活動年代應晚於 Unit 4 的沉積年代，早於 Unit 2 的沉積年代，約 2360-10 cal yr BP 之間。

為了分析 1 號槽溝剖面所紀錄的古地震事件，槽溝的東牆及西牆皆需進行構造回復，並檢視兩牆的古地震事件是否可以相互對應。回復構造的原則為：將未變形沉積層逐步剝除，若有變形的情況則是先將沉積層回復至未變形，再將其剝除。槽溝西牆根據崩積楔形體、液化現象與褶曲的沉積層一共可推得 5 次古地震事件(圖 87、圖 88)，分別為：2018 年 2 月 6 日(事件一)、1951 年 10 月 22 日(事件二)、790-144 cal yr BP(事件三)、2360-1301 cal yr BP(事件四)、3980-2306 cal yr BP(事件五)。解析出古地震事件發生的年代可能介於哪兩個沉積層的沉積年代之間後，即可藉由沉積層年代之間距決定古地震可能發生的年代(圖 86)，而本研究推算古地震年代將以兩沉積層定年的最大年代範圍做為地震可能發生的年代。

事件一為 2018 年 2 月 6 日的花蓮地震。由於震前破裂尚未出現，地震後才出現地表破裂，因此可做為判斷米崙斷層於本次地震中活動的依據，然而此破裂跡僅出現於西牆，東牆並未發現破裂。

事件二為 1951 年 10 月 22 日的縱谷地震。由於槽溝中 Unit 2 為一崩積楔形體，說明有一次古地震事件可能發生於 Unit 2 與 Unit 3e 沉積年代之間，即西元 1678 年至西元 1971 年間，而在歷史上此年間記載最大的地震即為 1951 年的地震，故推斷此崩積體的形與這起地震相關。然而除了楔形形狀外並無更多證據顯示 Unit 2 的形成原因與地震相關，且此崩積體僅為小型的崩積體，故無法排除可能因天氣因素所造成的崩塌。

事件三可能發生的年代則為 790-144 cal yr BP 之間。判斷依據為褶曲的生長地層，根據構造回復的原則，需將褶曲的 Unit 3a-3c、Unit 4 及 Unit 5 逐步回復至水平，回復依據是先將 Unit 5 斜傾的角度回到水平，而其他的

沉積層也以相同角度回復，僅經過一次回復，所有的沉積層皆回到水平或是近乎水平，說明此段時間內可能發生一次或是數次的地震使 Unit 3a-3c、Unit 4 及 Unit 5 同時變形產生褶曲，而本研究中僅將此當作一次事件紀錄，而此次事件可能發生的年代介於 Unit 3c 跟 Unit 3d 之間，即 790-144 cal yr BP，並且與分支斷層的活動有關聯。

事件四可能發生的年代則為 2360-1301 cal yr BP 之間。此事件之判斷依據是根據常見於地震時的液化現象，可以從西牆、東牆及南牆剖面觀察到近分支斷層處的 Unit 6b 沉積物擠穿 Unit 5，並與 Unit 4 形成一明顯的界面。液化現象發生的時間應為 Unit 4 沉積之後，而在 Unit 3a 沉積之前，即 2360-1301 cal yr BP 之間，而此次事件年代間隔較大，原因為 Unit 3a 的定年結果為現生植物，所以此定年結果無法採用，故以 Unit 3b 的年代做為參考，造成此次事件可能發生的年代範圍較寬。由於事件三與事件四之間缺少直接的證據顯示兩者發生的先後順序，或是可能為同時發生的事件，然而回復剖面時，回復 Unit 3 的沉積層僅需一次即可將全部沉積層回復，說明這次的液化可能並未對 Unit 3 造成額外的變形，故推測液化現象的發生早於 Unit 3 的褶曲沉積層，並且與分支斷層的活動有關聯。

事件五可能發生的年代則為 3980-2306 cal yr BP 之間。槽溝中的 Unit 4 為另一較為大型的楔形崩積體，而造成崩積體之古地震可能發生的時間應於 Unit 5 沉積之後、Unit 4 沉積之前，即 3980-2306 cal yr BP 之間。

東牆剖面回復後則可觀察到事件三、事件四與事件五(圖 89)，判斷依據與西牆各個事件一致，而事件一與事件二則無法觀察到。事件一無法於東牆觀察到可能的原因為破裂跡未延伸至此。事件二則是由於東牆並未觀察到相關的楔形崩積體，可能原因為受地形與人為影響，Unit 2 底部於西牆的高程約 13.4 米，而相同高程對應到東牆則是出露傾斜的 Unit 3 沉積層，13.8

米以上則為回填土，顯示 Unit 3 沉積層出露於東牆的高程高於西牆，故沉積於其上的 Unit 2 在東牆的部分已被回填土取代。

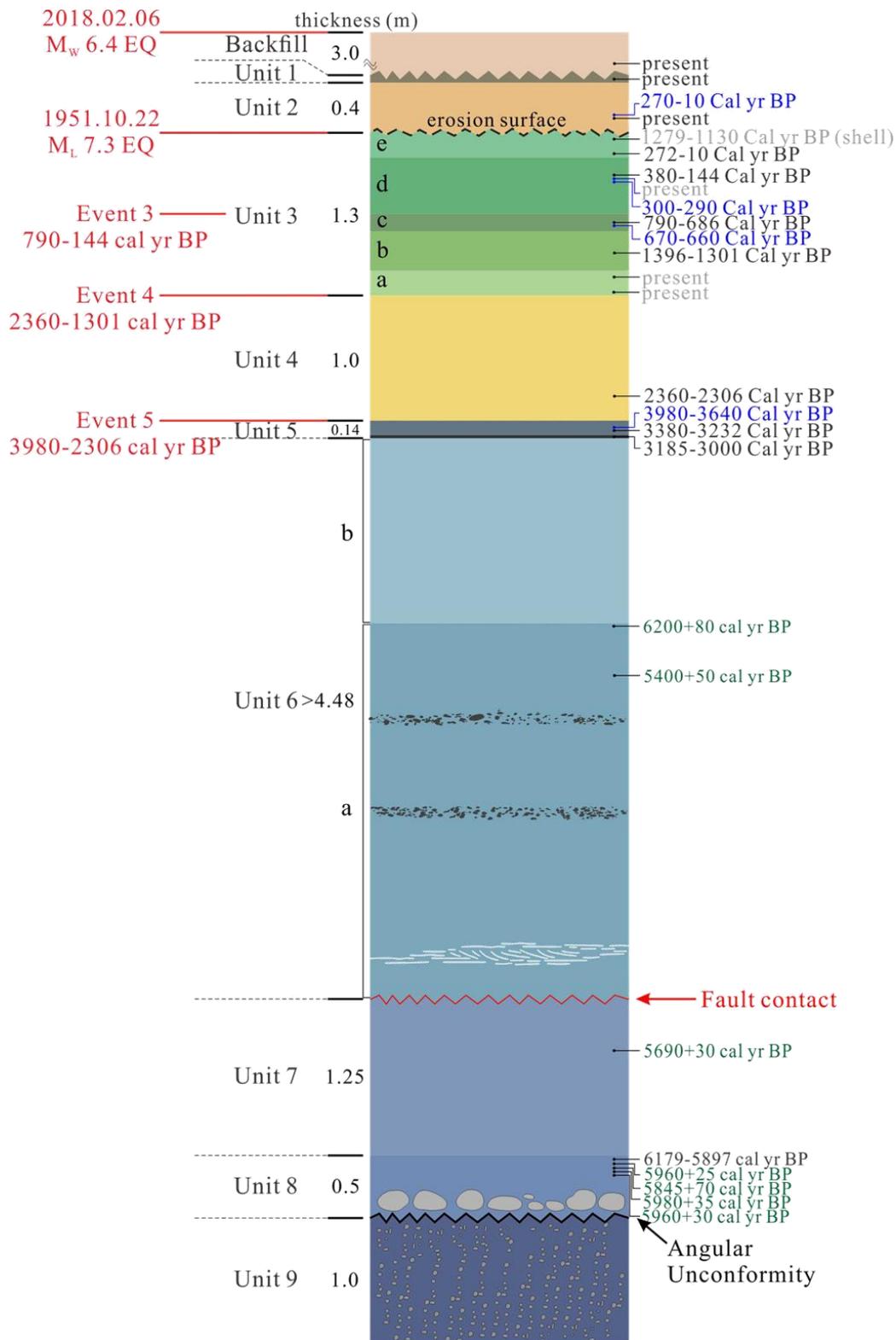
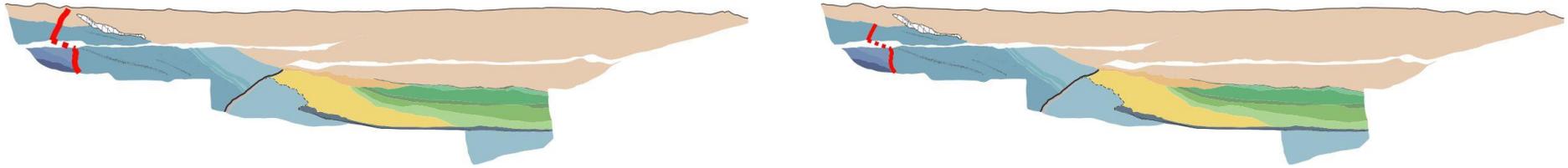


圖 86 區域地層柱及沉積年代。此區域可分成 9 個單元，Unit 2 跟 Unit 3 之間可能為一侵蝕面，Unit 8 跟 Unit 9 間為交角不整合接觸，Unit 6 跟 Unit 7 之間則為斷層接觸。左側為本研究解析出的古地震事件年代。以綠色標示的年代為陳文山教授提供之資料，灰色則是不採用之年代資料。

Event 1: 2018 Hualien earthquake



Event 2: 1951 earthquake



Event 3: 790-144 cal yr BP

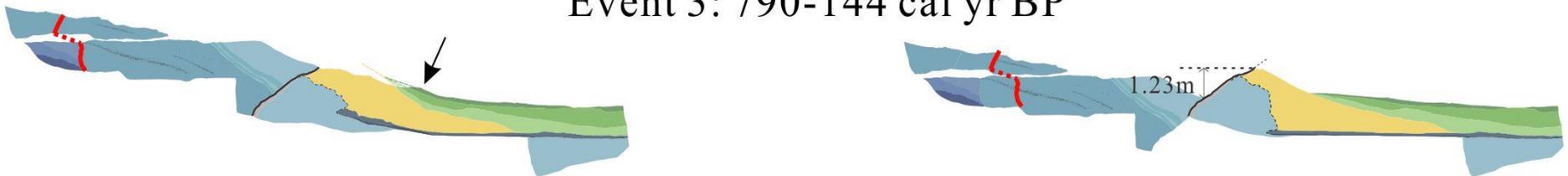


圖 87 1 號槽溝西牆剖面之構造回復圖(事件一~事件三)。左側皆為地震發生後之剖面，右側為地震前之剖面，黑色箭頭為每次事件的判斷依據，數字為剖面回覆時可能的累積垂直錯移量。

Event 4: 2360-1301 cal yr BP



圖 88 1 號槽溝西牆剖面之構造回復圖(事件四~事件五)。左側皆為地震發生後之剖面，右側為地震前之剖面，黑色箭頭為每次事件的判斷依據，數字為剖面回覆時可能的累積垂直錯移量。

Event 3: 790-144 cal yr BP



Event 4: 2360-1301 cal yr BP



Event 5: 3980-2306 cal yr BP



圖 89 1 號槽溝東牆剖面之構造回復圖。左側皆為地震發生後之剖面，右側為地震前之剖面，黑色箭頭為每次事件的判斷依據，數字為剖面回覆時可能的累積垂直錯移量。

6-2 地震再現週期分析

本研究利用槽溝開挖方式分析出過去米崙斷層的古地震事件，這些事件分別發生於 2018 年 2 月 6 日(事件一)、1951 年 10 月 22 日(事件二)、790-144 cal yr BP(事件三)、2360-1301 cal yr BP(事件四)、3980-2306 cal yr BP(事件五)。

由於古地震事件通常為一可能的時間範圍，故先取每次事件的中間值做為事件發生年代的代表，再將每次事件發生的年代相減，故年代間隔分別為 67 年(1951-2018)、468 年(467 BP-1951 AD)、1364 年(1831 BP-467 BP)、1312 年(3143 BP-1831 BP) (表 7)。根據上述之每次古地震事件之間的年代間隔變化，可以看到每次事件相隔的時間皆不一樣，五次事件相隔的時間即包含一次不到一百年之間隔以及兩次超過一千年的間隔(圖 90)，顯示米崙斷層的活動周期並不具有規律性，可能的原因為：有些地震可能並未記錄於槽溝內而使事件次數低估，如一千多年的時間間隔可能也有地震發生，只是並未於於此處的沉積層留下紀錄；另外由於米崙斷層位於複雜的地體構造環境，周圍亦存在多重的發震構造，亦可能觸發米崙斷層的活動，然而從槽溝中難以分辨出致震的來源，故無法分析出米崙斷層是否真的具有特徵地震的活動特性，或是若為特徵地震，難以推估出實際的再現週期。

根據槽溝與鑽井資料，顯示米崙斷層具有垂直向的錯移量，然而 2018 地震中並未於槽溝觀察到垂直錯移量，說明米崙斷層每次的變形行為並不一致，可能並不具有特徵地震的活動特性，因此也並無固定的再現周期。然而每次事件之間隔時間過大，較合理的推測為仍有部分的事件並未被找到，因此仍需更多資料加入以進一步釐清。

表 7 古地震事件之時間間隔

事件	發生年代中間值(年代範圍)	與前一次事件的時間間隔
一	西元 2018.02.06	67 yrs
二	西元 1951.10.22	468 yrs
三	467 (790-144 cal yr BP)	1364 yrs
四	1831 (2360-1301 cal yr BP)	1312 yrs
五	3143 (3980-2306 cal yr BP)	-

平均週期：803 yrs

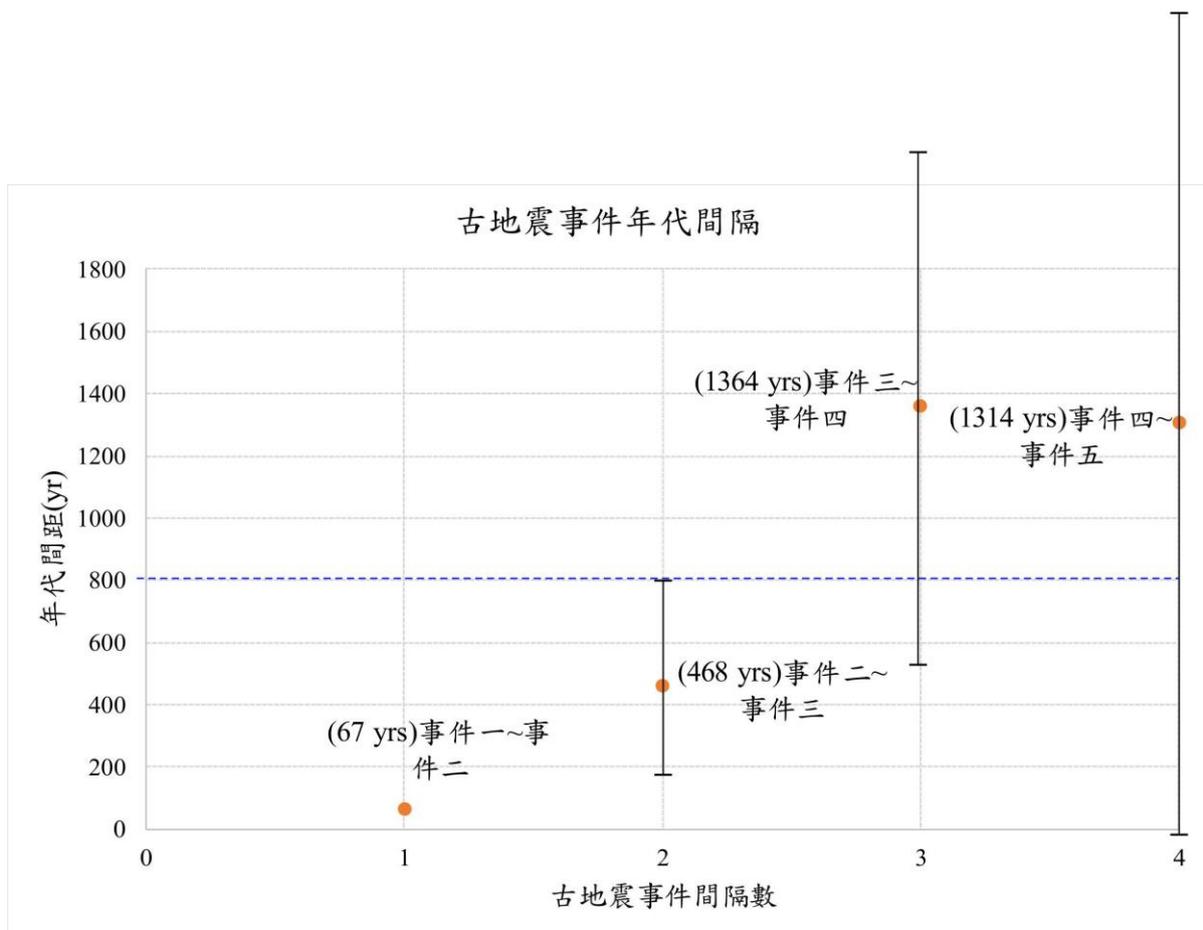


圖 90 古地震事件年代間隔分布圖。藍色虛線為平均週期位置。

6-3 斷層垂直錯移速率分析

斷層的錯移速率或是滑移速率也是地震災害評估其中一個重要的參考，根據鑽井結果中上下盤的淘選度差礫石層之高程差，計算出米崙斷層的垂直錯移量約 17.9 至 18.6 米，並配合 2 號槽溝中的定年結果，此定年樣本位於上盤淘選度差礫石層的上界以上約 2.5 米，定年年代為 3143-2794 cal yr BP，故可推估米崙斷層過去約三千年以來，上下盤間相對的垂直錯移速率為 5.7-6.7 mm/yr，由於使用的定年資料是礫石層上界以上的年代，因此本研究推算的錯移速率可能略高於實際速率。由於 2 號槽溝上盤的沉積層可以對比到 1 號槽溝的 Unit 6，若以 1 號槽溝的定年資料來看，年代為 5400-6200 cal yr BP，由此年代來推估垂直錯移速率則為 2.9-3.4 mm/yr。

將上述所推估的兩種錯移速率取中間值，並與 1951 年至 2018 年所相差的 67 年相乘，若垂直錯移速率為 5.7-6.7 mm/yr，此 67 年間所累積的抬升量約 41.4 公分，若垂直錯移速率為 2.9-3.4 mm/yr，所累積的抬升量則約 21.2 公分。根據 2018 年地震實際觀察到的同震地表變形，七星潭海岸出現的抬升量約 20 公分，因此垂直錯移速率為 2.9-3.4 mm/yr 應較為合理。根據 1951 年地震所記錄到的花蓮機場東側抬升 50 公分，並藉由本研究所計算的垂直錯移速率，可以推估累積此抬升量所需的時間為 158 年，由 2018 年及 1951 年實際觀察到的變形結果並配合米崙斷層的垂直錯移速率，顯示米崙斷層的地震再現周期可能為 67-158 年左右，相較於本研究槽溝所記錄的古地震事件之間隔還要短很多，說明可能仍有古地震事件並未記錄於槽溝中。

利用鑽井資料中推算出的垂直錯移速率，以及鑽井結果分析出的米崙斷層最低傾角為 69° ，可推算出斷層面上垂直走向之滑移速率至少需為 3.1~3.7 mm/yr，然而由於水平方向的滑移量難以計算，因此無法推算實際滑移速率。

第七章 結論

整合槽溝開挖剖面與鑽井資料，本研究針對米崙斷層的位態資訊、古地震事件記錄、地震再現週期及長期垂直錯移速率提出以下四點結論：

1. 本研究於花蓮空軍基地內的 2018 地震地表破裂進行槽溝開挖，1 號槽溝結果顯示近地表的米崙斷層主斷層於西牆的走向為 $N34^{\circ}E$ ，傾角則是 80° 向東傾，且為本次地震中活動的斷層。另外在主斷層北側亦有分支斷層，分支斷層於西牆的走向為 $N26^{\circ}E$ ，傾角則是 36° 向東傾；出露於東牆的主斷層走向為 $N50^{\circ}E$ ，傾角為 78° 向東傾，而兩條分支斷層的走向則分別是 $N40^{\circ}E$ 與 $N28^{\circ}E$ ，傾角則分別以 70° 及 56° 向東傾。而根據鑽井結果所得之垂直錯移量，以及上下盤鑽井的水平距離，可推算出米崙斷層的主斷層傾角至少大於 69° 。
2. 1 號槽溝剖面上與古地震相關之特徵，如楔形崩積體、褶曲之生長地層及液化現象，根據這些現象將剖面逐步進行回復與剝除沉積層，可分析出五次古地震事件記錄於 1 號槽溝，事件年代分別為：2018 年 2 月 6 日(事件一)、1951 年 10 月 22 日(事件二)、790-144 cal yr BP(事件三)、2360-1301 cal yr BP(事件四)、3980-2306 cal yr BP(事件五)。
3. 五次古地震事件的年代間距差異甚大，最短僅 67 年，最久可能超過一千年以上，說明可能仍有其他古地震事件未記錄於此槽溝內，而使其不具有規律性，且米崙斷層位於複雜的地體構造環境，周圍亦存在多重的發震構造，亦可能觸發米崙斷層的活動，然而從槽溝中難以分辨出致震的來源，故無法分析出米崙斷層是否真的具有特徵地震的活動特性。
4. 從鑽井岩性對比之結果，鑽井中出露的淘選度差礫石層顯示米崙斷層上盤的垂直錯移量約 17.9-18.6 米，並根據 1 號槽溝中 Unit 6 的年代約 5400-6200 cal yr BP，推估米崙斷層過去約六千年以來最大的垂直錯移

速率為 2.9-3.4 mm/yr，而斷層面上垂直走向之滑移速率則約 3.1~3.7 mm/yr。

參考文獻

- Ameen, M. S., "Macrofaults in the Purbeck-Isle of Wight monocline",
Proceedings of the Geologists' Association, Vol. 101, pp. 31-46, 1990.
- Bonilla, M. G., "A Review of Recently Active Faults in Taiwan", U. S. Geological
Survey Open-File Report, 1975.
- Cheng, S. N., Yeh, Y. T. and Yu, M. S., "The 1951 Taitung earthquake in Taiwan",
Journal of the Geological Society of China, Vol. 39, pp. 267-285, 1996.
- Cheng, S. N., Yu, T. T., Yeh, Y. T. and Chang, Z. S., "Relocation of the 1951
Hualien, Taitung earthquake sequence, conference on weather analysis and
forecasting", Proc. of Marine Meteorology and Seismology, in
Commemoration of 100 Years of Weather Observation in the Taiwan Area,
pp. 690-699, 1997.
- Chi, W. R., Huang, H. M. and Wu, J. C., "Ages of the Milun and Pinanshan
conglomerates and their bearings on the Quaternary movement of eastern
Taiwan", Proceedings of the geological society of China, Vol. 26, pp. 67-
75, 1983.
- Hsu, T. L., "Recent Faulting in the Longitudinal Valley of Eastern Taiwan",
Memoir of the Geological Society of China, Vol. 1, pp. 95-102, 1962.
- Huang, S. Y., Yen, J. Y., Wu, B. L., Yen, I. C. and Chuang, R. Y., "Investigating
the Milun Fault: The coseismic surface rupture zone of the 2018/02/06 ML
6.2 Hualien earthquake, Taiwan", Terr. Atmos. Ocean. Sci., Vol. 30, pp. 1-
25, 2019.
- Konishi, Kenji, Omuro, Akio and Tashio, K., "234U-230Th Dating of some late
Quaternary Coralline Limestone from Southern Taiwan (Formosa)", Geol.

- and Pal. Southeast Asia, Vol. 5, pp. 211-224, 1968.
- Lee, S. J., Lin, T. C., Liu, T. Y. and Wong, T. P., "Fault-to-Fault Jumping Rupture of the 2018 Mw 6.4 Hualien Earthquake in Eastern Taiwan", *Seismological Research Letters*, Vol. 90(1), pp. 30-39, 2019.
- Libby, W. F., Anderson, E. C. and Arnold, J. R., "Age Determination by Radiocarbon Content: World-Wide Assay of Natural Radiocarbon", *Science*, Vol. 109, 1949.
- Lin, C. C., "Holocene geology of Taiwan", *Acta Geologica Taiwanica*, Vol. 13, pp. 83-126, 1969.
- Reimer, P. J., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J. W., Blackwell, P. G., Ramsey, C. B., Buck, C. E., Cheng, H., Edwards, R. L., Friedrich, M., Grootes, P. M., Guilderson, T. P., Haflidason, H., Hajdas, I., Hatté, C., Heaton, T. J., Hoffmann, D. L., Hogg, A. G., Hughen, K. A., Kaiser, K. F., Kromer, B., Manning, S. W., Niu, M., Reimer, R. W., Richards, D. A., Scott, E. M., Southon, J. R., Staff, R. A., Turney, C. S. M. and Plicht, J., "INTCAL13 and Marine 13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0-50,000 Years Cal BP", *Radiocarbon*, Vol. 55(4), pp. 1869-1887, 2013.
- Sanford, A. R., "Analytical and experimental study of simple geologic structures", *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 70, pp. 19-52, 1959.
- Shyu, J. B. H., Sieh, K., Chen, Y. G. and Liu, C. S., "Neotectonic architecture of Taiwan and its implications for future large earthquakes", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 110(B8), 2005.
- Shyu, J. B. H., Chen, C. F. and Wu, Y. M., "Seismotectonic characteristics of the northernmost Longitudinal Valley, eastern Taiwan: Structural development

- of a vanishing suture", *Tectonophysics*, Vol. 692, pp. 295-308, 2016.
- Shyu, J. B. H., Chuang, Y. R., Chen, Y. L., Lee, Y. R. and Cheng, C. T., "A New On-Land Seismogenic Structure Source Database from the Taiwan Earthquake Model (TEM) Project for Seismic Hazard Analysis of Taiwan", *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, Vol. 27(3), 2016.
- Yamaguchi, M. and Ota, Y. K., "Tectonic and Paleoseismological Significance of Holocene Marine Terraces on the East Coast of Coastal Range, Taiwan", *Journal of Geography*, Vol. 111(3), pp. 323-340, 2002.
- Yang, Y. H., Hu, J. C., Tung, H., Tsai, M. C., Chen, Q., Xu, Q., Zhang, Y. J., Zhao, J. J., Liu, G. X., Xiong, J. N., Wang, J. Y., Yu, B., Chiu, C. Y. and Su, Z., "Co-Seismic and Postseismic Fault Models of the 2018 Mw 6.4 Hualien Earthquake Occurred in the Junction of Collision and Subduction Boundaries Offshore Eastern Taiwan", *Remote Sensing*, Vol. 10(9), 2018.
- Yu, S. B., Chen, H. Y. and Kuo, L. C., "Velocity field of GPS stations in the Taiwan area", *Tectonophysics*, Vol. 274, pp. 41-59, 1997.
- 石再添，張瑞津，黃朝恩，石慶得，楊貴三和孫林耀明，「臺灣北部與東部活斷層的地形學研究」，臺灣師範大學地理研究所地理研究報告，第9期，20-72頁，1983。
- 朱傲祖和游明聖，「花東縱谷活動斷層調查研究」，行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告，186頁，1995。
- 何邦碩，「花蓮近海海域地球物理初步測勘」，海洋彙刊，12，39-47頁，1974。
- 林明聖和蕭謙麗，「米崙礫岩台上的橫移斷層系統」，東台灣研究，13-29頁，1998。
- 林啟文，陳文山，劉彥求和陳柏村，「米崙斷層」，經濟部中央地質調查所特

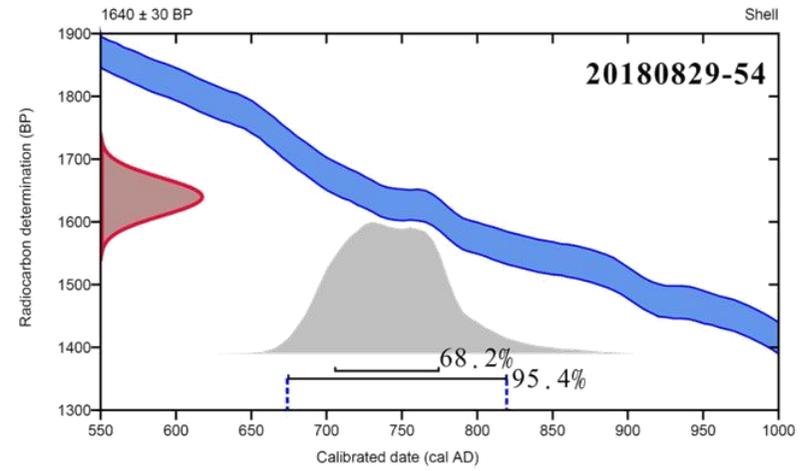
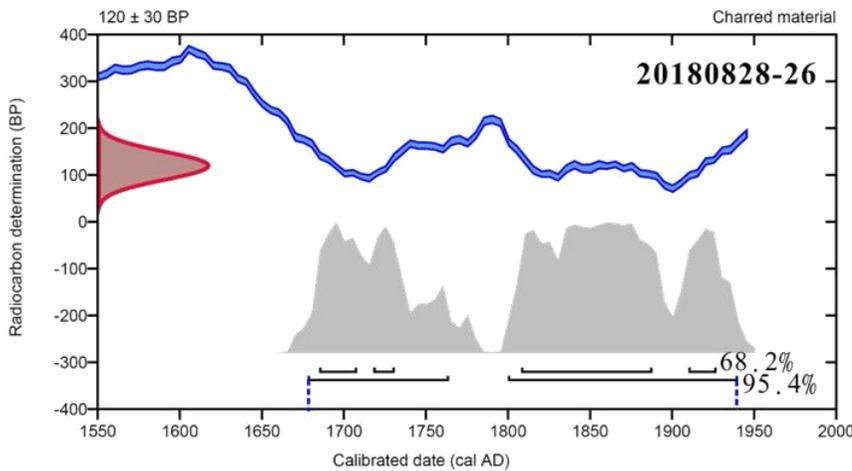
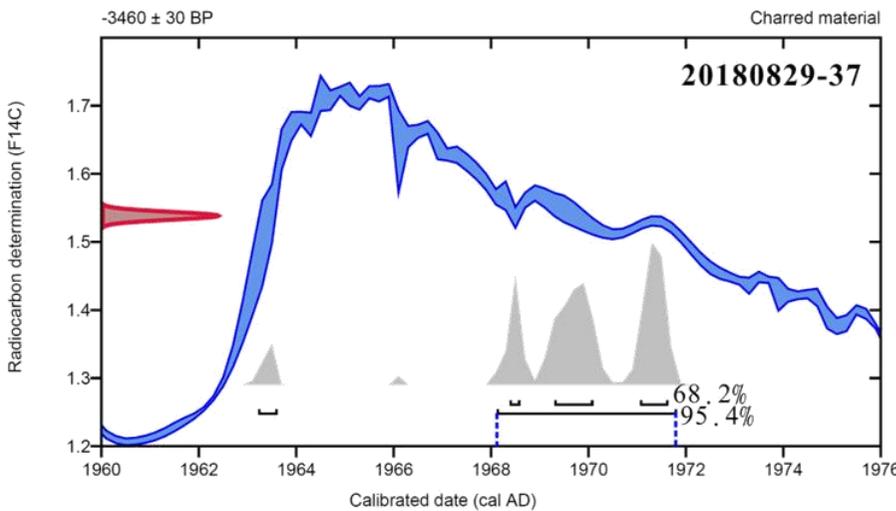
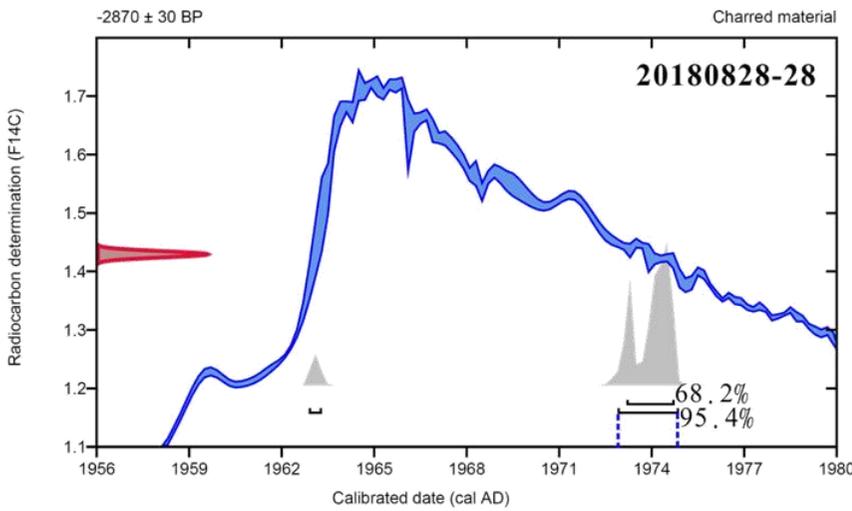
- 刊，23，11-20 頁，2009。
- 林朝榮，「臺灣之地形」，臺灣省通誌，1，地理篇，424 頁，1957。
- 林朝榮，「花蓮地方的第四系-臺灣之第四紀研究(三)」，國家長期發展科學委員會研究報告，42 頁，1962。
- 林廉凱，「台灣東部縱谷北端海域海底地形及構造之研究」，國立中央大學地球科學學系碩士論文，2017。
- 張舜傑，「以淺層反射震測法調查花蓮市地區地下地質構造」，國立中央大學地球物理研究所碩士論文，109 頁，1994。
- 陳文山，「槽溝開挖與古地震研究計畫(3/5) - 一、槽溝開挖與古地震研究」，經濟部中央地質調查所報告，97 頁，2004。
- 陳文山，游能悌和楊小青，「重要活動斷層構造特性調查研究計畫-活動斷層特性分析與評估(2/4)」，經濟部中央地質調查所報告，101-9，2012。
- 楊貴三，「臺灣活斷層的地形學研究-特論活斷層與地形面的關係」，私立中國文化大學地學研究所博士論文，178 頁，1986。
- 經濟部中央地質調查所，「20180206 花蓮地震地質調查報告」，經濟部中央地質調查所報告，127 頁，2018。
- 廖宏祥，「米崙斷層淺層震測研究」，國立中正大學地震研究所碩士論文，82 頁，2006。
- 臺灣省氣象所，「中華民國 41 年地震報告」，83 頁，1952。
- 劉平妹和謝孟龍，「台灣東部晚第四紀地質調查及地形演育研究(2/2)」，經濟部中央地質調查所報告，149 頁，2007。
- 劉啟清，「臺灣地區地殼變動對驗潮記錄之影響」，第二屆臺灣地區地球物理研討會論文集，1988。
- 劉聰桂，「碳十四定年法」，地質，16，125-139 頁，1997。

謝孟龍和鄧屬予，「米崙礫岩的岩相及沉積環境」，地質，**14**，1，201-217 頁，1994。

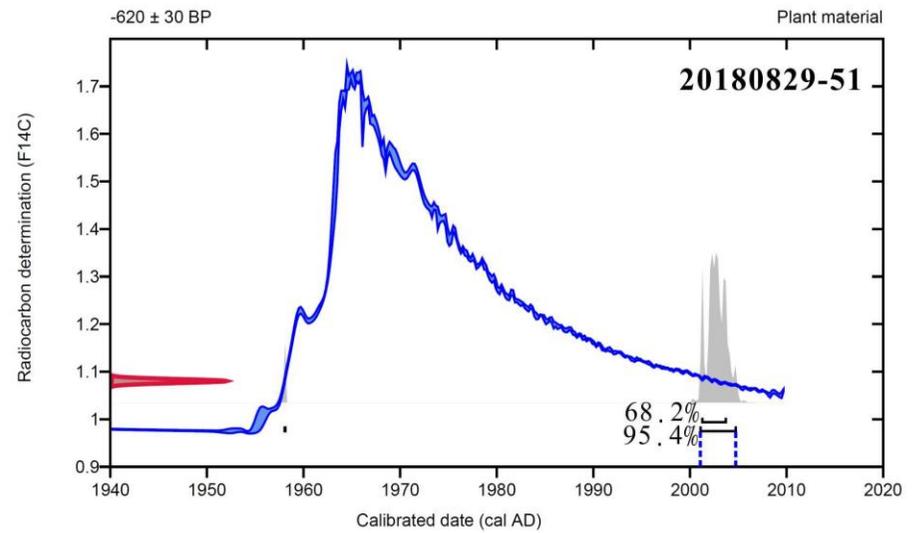
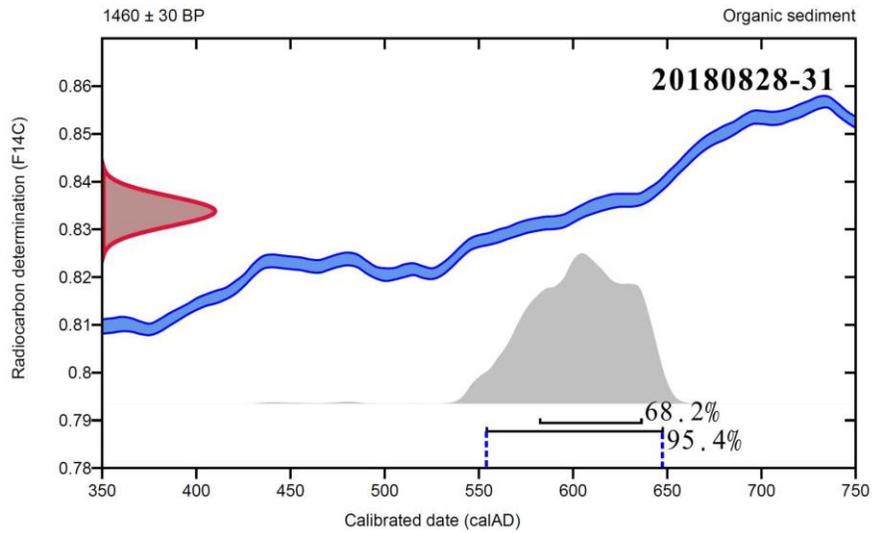
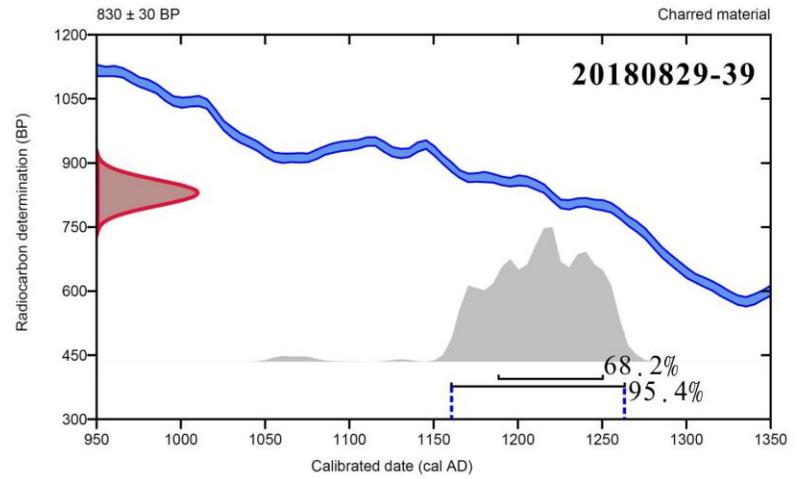
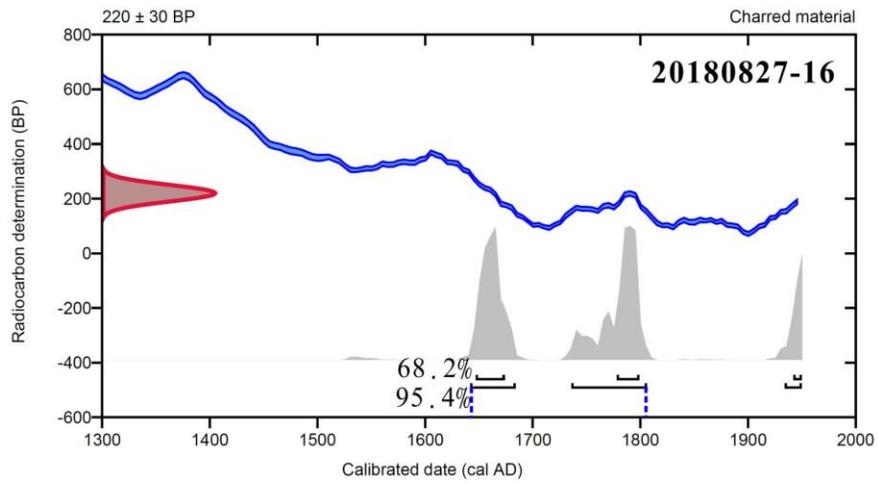
鍾令和，石同生，劉彥求，許文靈，謝中敏和吳文綜，「活動斷層調查報告-米崙斷層」，經濟部中央地質調查所報告，2004。

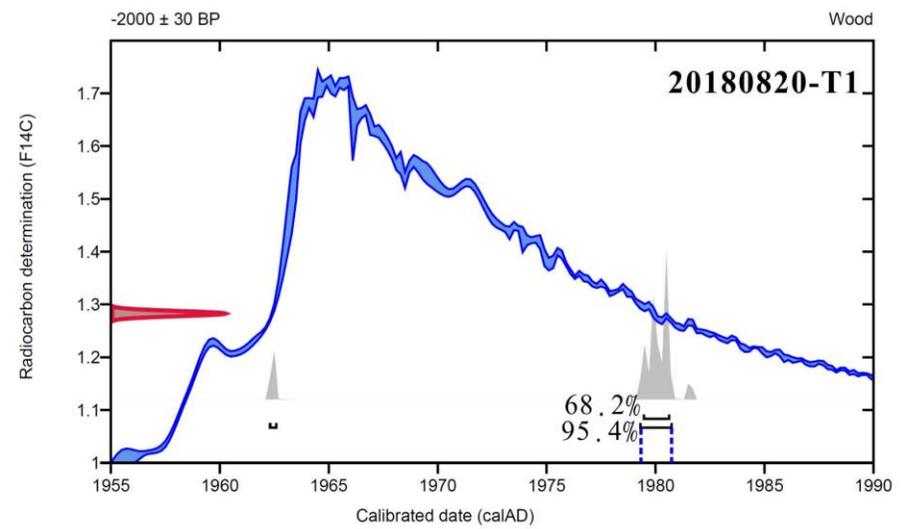
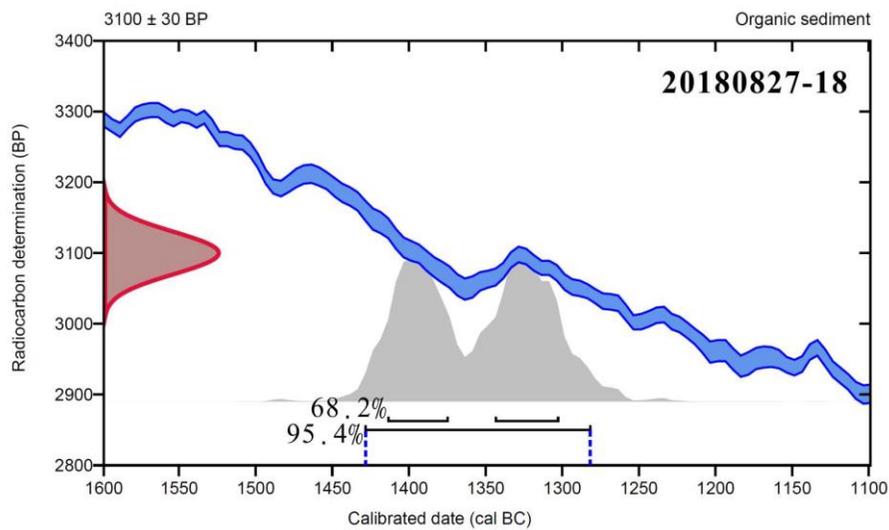
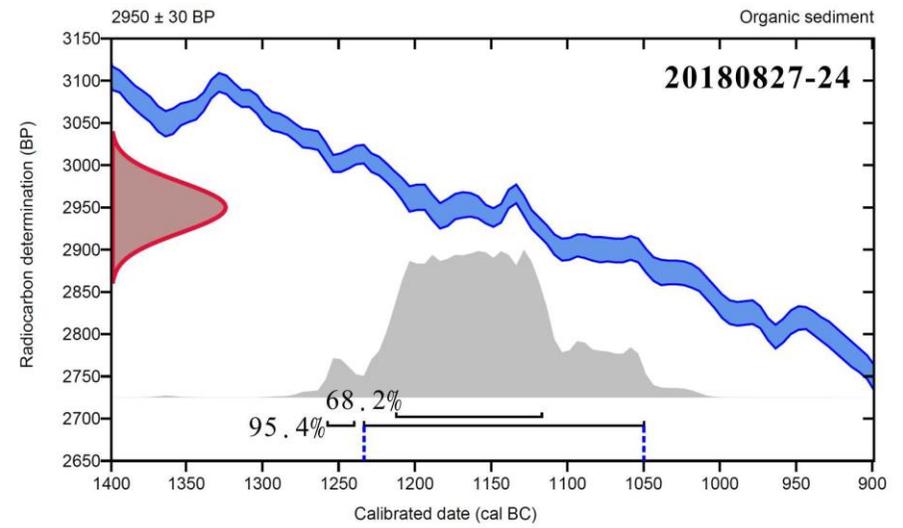
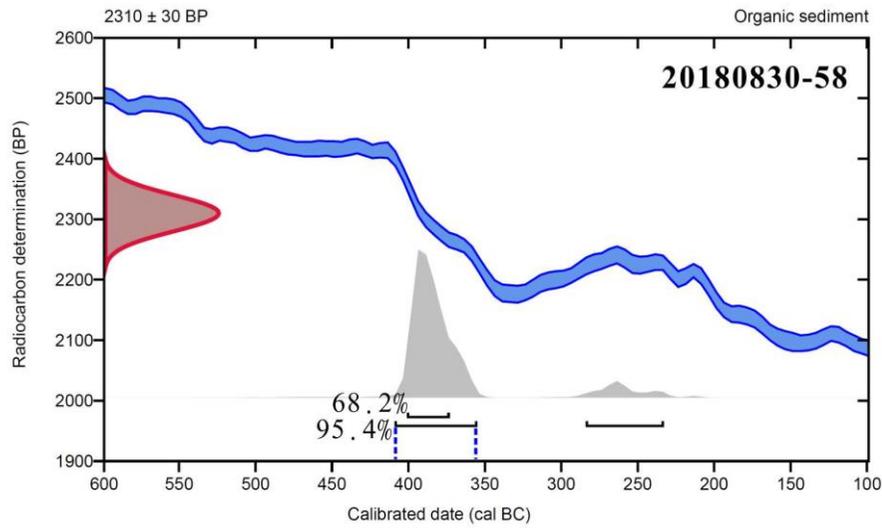
饒瑞鈞，余致義，胡植慶，李建成，詹瑜璋，洪日豪和許麗文，「地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫：活動斷層監測系統計畫」，經濟部中央地質調查所報告，222 頁，2006。

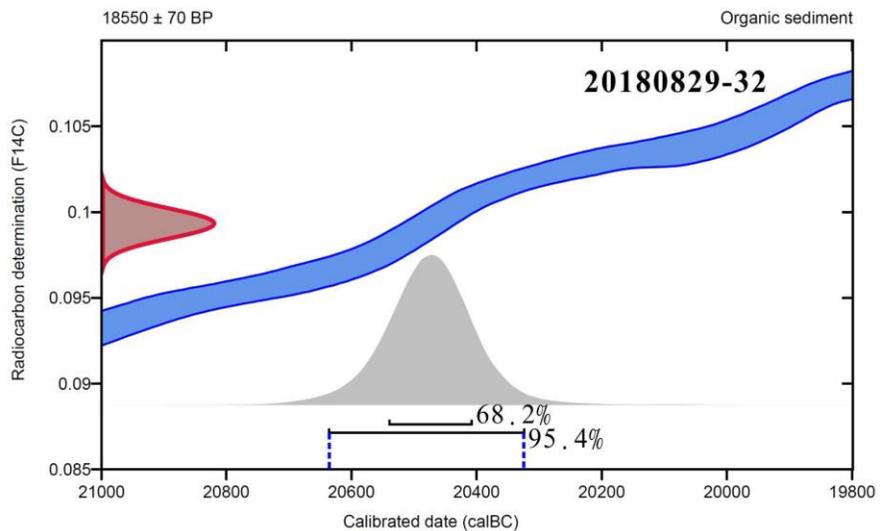
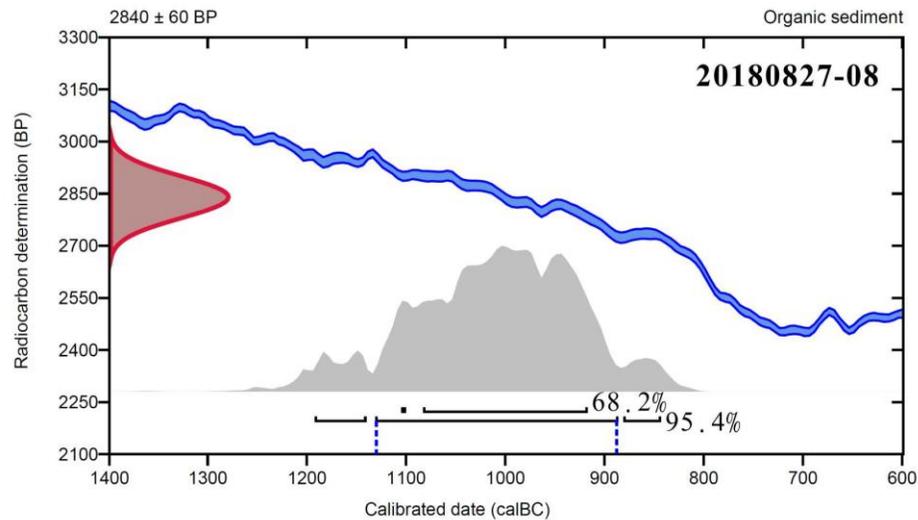
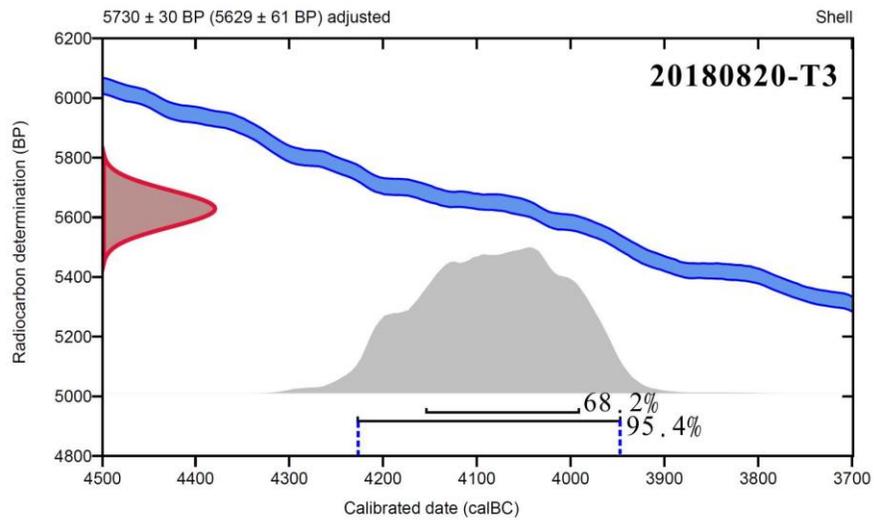
附錄一 標本定年年代校正結果



註：藍色需線範圍為本研究所採用之可能校正年代範圍。







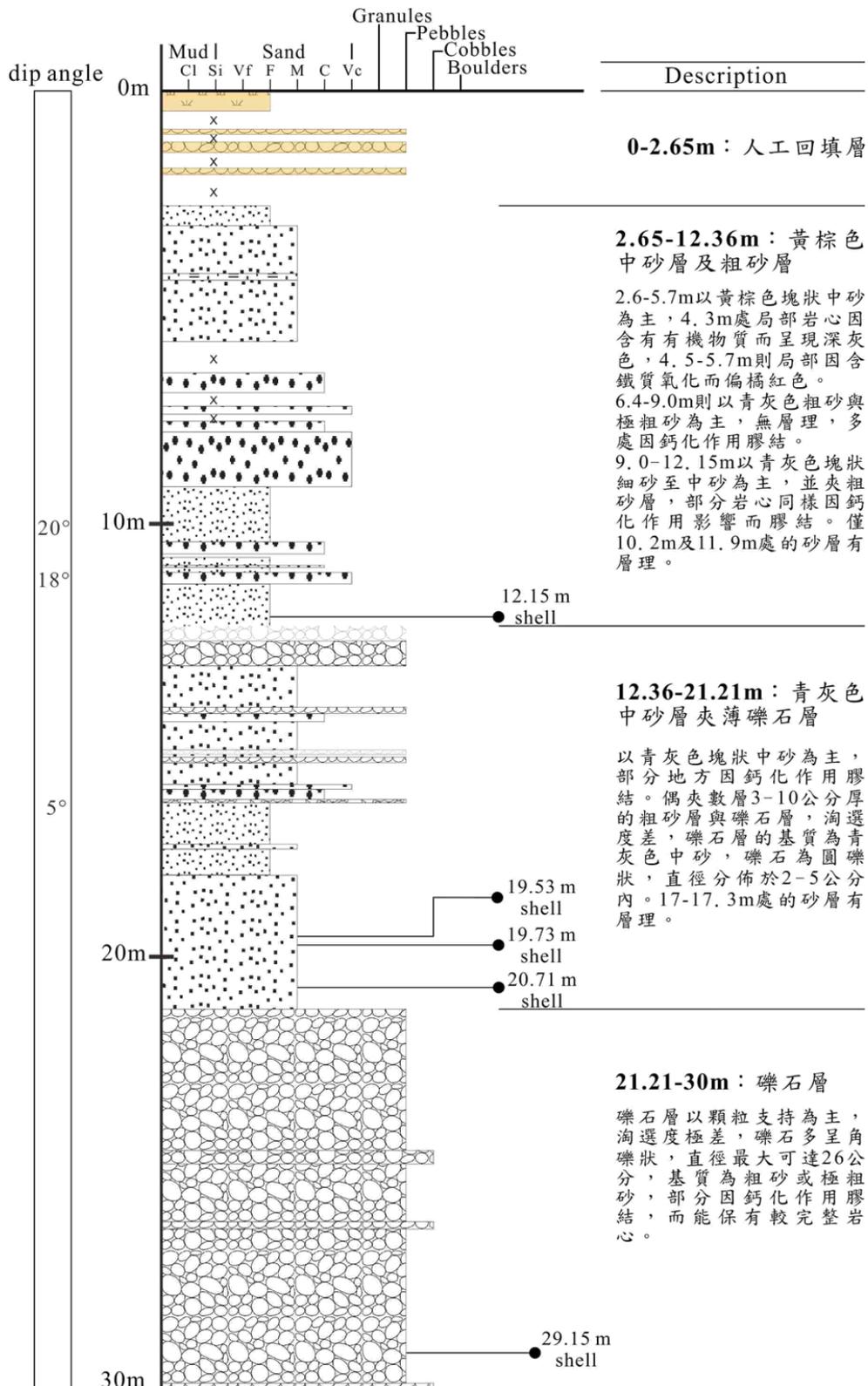
附錄二 鑽井岩心照片與分層

BH-01 岩心照片：





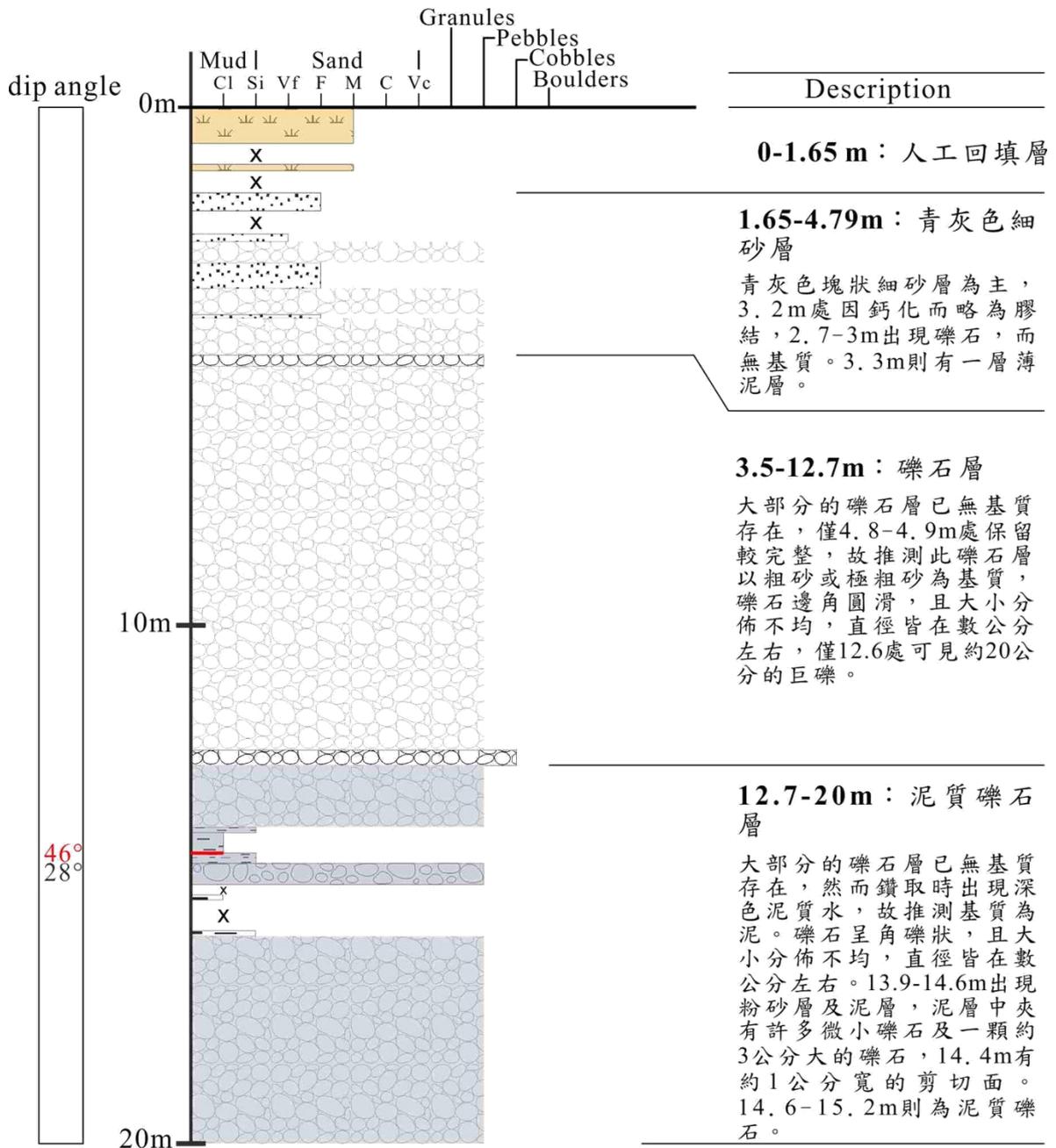
BH-01 岩心分層：



BH-02 岩心照片：



BH-02 岩心分層：

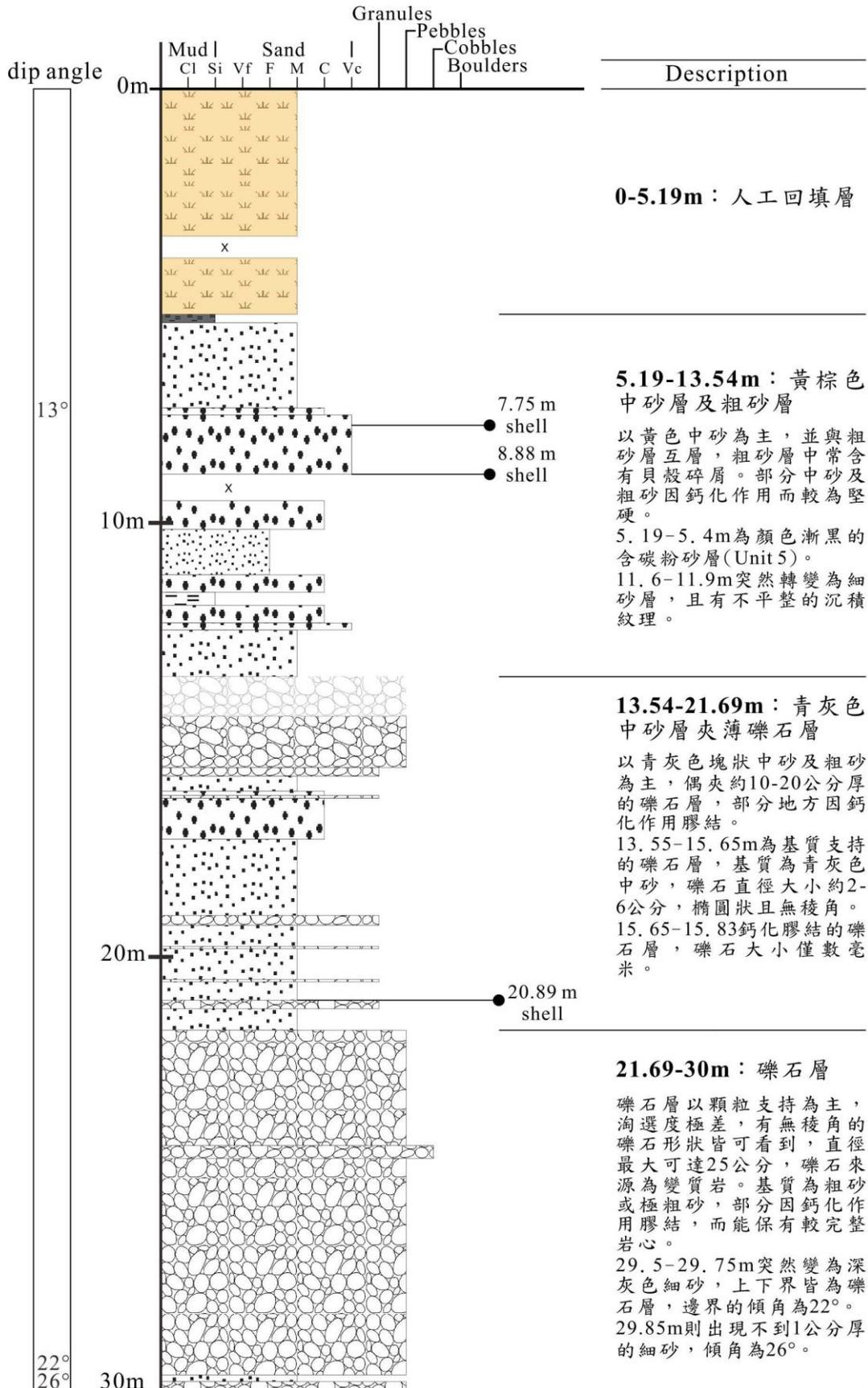


BH-03 岩心照片：





BH-03 岩心分層：



BH-04 岩心照片：





BH-04 岩心分層：

