國立中央大學

應用地質研究所 碩士論文

台灣中部三義斷層於后里-豐原地區之近地 表地質構造特性研究

The subsurface structure characteristics of Sanyi active fault in the Houli-Fengyuan area, central western Taiwan

研究生:謝承恩

指導教授:黃文正博士

中華民國一百零六年一月

	· 國山中央大學圖書館 · 碩博士論文電子檔授權書
«V»	(101 年 9 月最新修正版)
本授權書授 明),在「『 (~)] ()]	ξ權本人撰寫之碩/博士學位論文 <u>全文電子檔</u> (不包含紙本、詳備註 1 說 國立中央大學圖書館博碩士論文系統」。(以下請擇一勾選) <u>司意</u> (立即開放) <u>同意</u> (請於西元年月日開放)
在國家圖書 (~)] (~)] (~)]	<u>「「「」」」</u> 「」」」」」」 「「」」」」」 「」」 「」」 「」」 「」」 「
以非專屬、 於推動「 地域、時間 與利用,並 個人非營利 研究生簽名	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 臺源共享、互惠合作」之理念,於回饋社會與學術研究之目的,得不限 到與次數,以紙本、微縮、光碟及其它各種方法將上列論文收錄、重製、 之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 則性質之線上檢索、閱覽、下載或列印。 A: 247 24 9 學號: 103624014
論文名稱:_	台灣中部三義斷層於后里-豐原地區之近地表地質構造特性研究
指導教授始 系所 : 備註:	±名:黃文正 應用地質研究所 □ <u>博士班</u> ■碩士班
1. 本授鼎 定原則 架陳勇 2. 本授鼎 资盈	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 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 』,須另行加填聲明書,詳細說明與紙本聲明書請至 <u>http://thesis.lib.ncu.edu.tw/</u> 下載。 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 可用電腦打字代替)。 1一份單張之授權書,填寫並親筆簽名後,於辦理離校時交圖書館(以統一代轉寄給 間書館)。 點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

<u>應用地質</u>學系/研究所<u>謝承恩</u>研究生所提之論文 台灣中部三義斷層於后里-豐原地區之近地表地質構 造特性研究

係由本人指導撰述,同意提付審查。

指導教授 萧文正 (簽章)

2017年1月18日

國立中央大學碩士班研究生論文口試委員審定書

<u>應用地質</u>學系/研究所<u>謝承恩</u>研究生 所提之論文

<u>台灣中部三義斷層於后里-豐原地區之近地表地質構</u> 造特性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	363205
委 員	で見えり
	表表达成
	参元弟
	黄文庄,

中華民國 一百零五 年 十二 月 二十二 日

台灣中部三義斷層於后里-豐原地區之近地表地質構造特

性研究

中文摘要

三義斷層為經濟部中央地質調查所歸類的第一類活動斷層。然而大安 溪以南露頭稀少,無連續露頭點判定三義斷層確實位置,因此本研究蒐集豐 原市區鑽探資料、地電阻影像,判定三義斷層可能位置以及斷層帶寬度;藉 調查大安溪以南,大甲溪南北岸露頭,做為確定三義斷層延伸位置的控制點, 並以無人飛行載具搭載高解析度相機,配合高精度測量地面控制點測繪,記 錄大甲溪畔三義斷層帶現今樣貌,以利未來研究活動斷層之變形行為;建立 地質構造剖面探討后里-豐原地區三義斷層的近地表地質構造特性。

本研究修訂豐原地區之三義斷層活動斷層跡,位於地調所版本之西側約500公尺。而三義斷層由南段至北段,層位落差由4600公尺轉為中段3600公尺,最北段三義地區再轉為4700公尺。三義斷層南北段構造特性不同,斷層南段上盤最老之岩層為桂竹林層;北段上盤出露老於桂竹林層之東坑層。根據本研究製做正射化的立面影像,三義斷層於大甲溪之斷層帶寬約500公尺,由至少4條錯移量不等的分支斷層(F1-F3)以及主斷層組成(F4)組成。F4主斷層出露於大甲溪南岸,為斷層帶的最西側,上盤為桂竹林層之青灰色砂岩,下盤為黃褐色沖積層。F1分支斷層,位於大甲溪北岸峭壁面的最西側高約30公尺處,截切厚約10公尺、沉積年代約為19589Cal BP之黃褐色砂層。

關鍵字:三義斷層、逆衝斷層、斷層活動性、無人飛行載具影像測繪

The subsurface structure characteristics of Sanyi active fault in the Houli-Fengyuan area of central Taiwan

English Abstract

Sanyi fault is an active fault, which has been classified into the first category because of cutting the recent alluvium by Central Geology Survey (CGS), MOEA, Taiwan. However, the nature of sparse outcrops south of the Da-an River shattered the confidence of investigators on determining its southern surface trace. In this study, drilling data, electrical resistivity image (ERI) data and field observations are collated to analyze and determine the locations of the southern Sanyi fault and possible widths of its fault zone. This study document the well-known Sanyi fault outcrop on Dajia River cliff and its surrounding area via the UAV-photogrammetry technique. Also, the benchmark of this site and integrate aforementioned data for locating the Sanyi fault southern trace are exploited in this study. Moreover, the vertical structural profiles across the southern Sanyi fault are constructed to compare with the subsurface geological structures north of the Da-an River displayed by others.

The Sanyi fault trace around Fengyuan area modified by this study is shifted about 500 meters west to the one in the CGS's latest version. The structural profiles across the fault illustrate that the maximum stratigraphic throws increase from 4600 m in the south to 3600 in the central, and 5080 m in the north along the Sanyi fault. The oldest strata exposed in hanging wall belong to late Moicene Kueichulin Fm south of the Da-an River. The strata of Tunkeng Fm, which is older than Kueichulin Fm, has been found in hanging wall north of the Da-an River. The UAV-based mapping result shows that there are at least 3 fault branches (F1-F3) associated with a main fault (F4) within the 500-meter-wide Sanyi fault zone. On the south bank of Dajia River, the F4 is located at the westernmost of the fault zone. Late Miocene strata belong to Kueichulin Fm in the hanging wall of the F4 while Holocene terrace deposits appear in the footwall. The F1 appears in the westernmost of the northern cliff and cuts through a 19589 Cal BP sandy layer with 10 meters thick.

Key words: Sanyi fault, thrust fault, fault activities, UAV-mapping

誌謝

首先感謝指導教授黃文正老師,能在百忙之中,幫助我順利完成整本論 文,並提供我很好的環境做研究,教導我寫作技巧,且不吝添購各種研究用 器材(無人飛行載具、電腦工作站、測繪軟體),更提醒了我許多待人處事的 小細節。也感謝北科大羅偉老師贊助實驗室軟體;台大韓仁毓老師提供測量 方面專業諮詢。在應用地質研究所,地質力學實驗室的二年多所學,無論是 構造地質方面的專業知識或是其他行政業務方面,收穫甚多,大概可以抵我 大學一年級到四年級都不誤正業跑社團的不足吧。

此外,也要感謝實驗室的前輩,大隊長阿根、小學姐詩婷、大師兄芊翔、 家祥,同期夥伴書睿、奕維,學弟妹于鈞、宜廷、彥如、雅筑(之後會加入), 與我一起外出調查或是在閒暇時討論各種問題,提供了很多想法。合作夥伴 翔富,要不是一年前在湖山水庫野外碰面,說不定我們還玩不出今天這樣的 UAV 測繪成果呢。台大彥廷學長,也感謝你提供測量方面的專業知識,好 讓我們的短篇文章順利在遙測及航測學刊發表。

I would like to thank Maryline and Antoine. Without your help, I won't have such courage to do the ¹⁴C sampling on the cliff. Also, thank you guys join the group, helping us practice our English and give ideas about our research.

同時我也要感謝我的家人,提供我良好的環境成長與正確的價值觀至 今,並適時給予鼓勵與督促;感謝戴秉倫時常與我分享研究或是時事問題, 讓我有新的發想,並時常一起打發休閒時間。另外也感謝,樂之、Anna、祉 晏等好友陪伴我研究以外的時光,讓我不那麼鑽牛角尖,轉換心情且充滿能 量。

最後,套句陳之藩所說的:「因為需要感謝的人太多了,就感謝天罷」。

謝承恩 僅誌

西元 2017 年 1 月

vii

中文摘要	iv
English Abstract	v
圖目錄	xi
表目錄	XV
一、緒論	1
1-1 前言	1
1-2 研究動機與目的	2
二、區域概況	4
2-1 地形與水系	4
2-2 地質概況	11
2-2-1 地層	13
2-2-2 大安溪以北至三義地區地質構造	19
2-2-3 大安溪以南后里-豐原地區地質構造	
三、研究資料	
3-1 LiDAR 地形陰影圖	
3-2 鑽井資料	
3-3 豐原市區地電阻影像	
四、研究方法	
4-1 地質剖面繪製方法	
4-2 地層定年-碳十四定年法	
4-3 UAV 影像測繪	46
4-3-1 無人飛行載具規格	

目錄

4-3-2 攝影測量	
4-3-3 全球衛星系統靜態測量	
4-3-4 UAV 影像測繪作業程序內容	
五、研究結果	60
5-1 大甲溪畔 UAV 影像測繪	60
5-1-1 控制點測量結果與檢核	60
5-1-2 模型誤差	61
5-2 后里區域野外調查	64
5-3 大甲溪露頭調查成果	69
5-3-1 大甲溪北岸峭壁立面圖判識與地質調查成果	69
5-3-2 大甲溪南岸地質調查	
5-4 豐原市區三義斷層跡位置	95
5-4-1 ERI 判識之斷層上下盤位置	95
5-4-2 整合 ERI 與鑽井資料判識	
5-5 三義斷層各段之地質剖面	
5-5-1 大安背斜剖面	
5-5-1 大安背斜剖面 5-5-2 大甲溪剖面	
5-5-1 大安背斜剖面 5-5-2 大甲溪剖面 5-5-3 豐原地區剖面	
5-5-1 大安背斜剖面 5-5-2 大甲溪剖面 5-5-3 豐原地區剖面 5-5-4 三義斷層的地下三維構造	
 5-5-1 大安背斜剖面 5-5-2 大甲溪剖面 5-5-3 豐原地區剖面 5-5-4 三義斷層的地下三維構造 5-6 三義斷層各段層位落差 	
 5-5-1 大安背斜剖面 5-5-2 大甲溪剖面	
 5-5-1 大安背斜剖面 5-5-2 大甲溪剖面 5-5-3 豐原地區剖面 5-5-4 三義斷層的地下三維構造 5-6 三義斷層各段層位落差 六、討論 6-1 大甲溪北岸峭壁地層年代 	
 5-5-1 大安背斜剖面 5-5-2 大甲溪剖面 5-5-3 豐原地區剖面	

6	5-3-1 后里地區三義斷層活動斷層跡	122
6	5-3-2 豐原地區三義斷層活動斷層跡	122
6-4	1 三義斷層的活動性	124
6-5	5 三義斷層南北段的構造差異	127
七、	結論與建議	128
八、	參考文獻	129
九、	附錄	133
A.	鑽井紀錄	133
B.	地電阻剖面影像	138
C.	大甲溪三義斷層帶正射影像	141

圖目錄

圖	1 三義斷層跡與鄰近區域之其他斷層。	3
圖	2 大安溪以北三義鄰近地區之地形 DTM。	5
圖	3 三義斷層沿線水系分區圖。	6
圖	4 后里台地之地形面與地形剖面。	8
圖	5 豐原地區地形面分類。	. 10
圖	6 三義斷層鄰近區域地質圖。	.12
圖	7 桂竹林層關刀山砂岩段。	.17
圖	8 桂竹林層十六分頁岩段。	.17
圖	9 頭嵙山層火炎山相礫岩。	. 18
圖	10 紅土階地堆積層。	. 18
圖	11 三義斷層大安溪以北地形陰影圖與剖面位置圖。	. 22
圖	12 三義斷層北段 A-A'剖面。	. 23
圖	13 三義斷層北段 B-B'剖面。	. 23
圖	14 三義斷層北段 C-C'剖面。	.24
圖	15 三義斷層北段 D-D'剖面。	.24
圖	16 跨三義斷層之震測剖面。	. 25
圖	17 苗栗上湖西南方三義斷層分支斷層露頭。	.26
圖	18 苗栗上湖西南方三義斷層分支斷層露頭判識圖。	. 26
圖	19 三義斷層伯公坑露頭。	. 27
圖	20 三義斷層伯公坑露頭判識圖。	. 27
圖	21 三義斷層北段構造演化順序圖。	. 28
圖	22 三義斷層北段構造演化剖面圖。	. 28
圖	23 后里台地東側鑽井位置、槽溝和剖面位置圖。	. 30
圖	24 后里2號槽溝北牆剖面照片與判識圖。	.31

圖	25 后里 2 號槽溝南牆剖面照片與判識圖。	. 31
圖	26 后里台地東側 A-A'剖面。	. 32
圖	27 后里台地東側 B-B'剖面。	. 32
圖	28 后里台地東側 C-C'剖面。	. 33
圖	29 后里台地東側 D-D'剖面。	. 33
圖	30 大甲溪北岸露頭構造判識圖。	. 35
圖	31 大甲溪北岸露頭構造判識圖。	. 35
圖	32 大甲溪北岸台鐵隧道西側露頭。	. 36
圖	33 大甲溪溪床分支斷層 SF1-SF5。	. 36
圖	34 地電阻調查電極排列示意圖。	. 38
圖	35 后里-豐原地區鑽井位置以及地電阻測線位置圖。	. 39
圖	36 后里-豐原地區鑽井位置以及地電阻測線位置圖(續圖 35)。	.40
圖	37 后里-豐原地區鑽井位置以及地電阻測線位置圖(續圖 35)。	.41
圖	38 以急折法繪製地質剖面步驟示意圖。	. 43
圖	39 本研究所使用之無人飛行載具器材。	. 48
圖	40 像平面和物空間平面示意圖。	. 50
圖	41 空中三角測量共線條件原理示意圖。	. 53
圖	42 Pix4Dmapper pro 影像匹配誤差示意圖。	. 54
圖	43 本研究 GPS 靜態測量施測過程示意圖。	. 57
圖	44 控制點和一等水準點空間分布示意圖。	. 57
圖	45 UAV 影像測繪作業流程圖。	. 58
圖	46 航空標示意圖。	. 59
圖	47 大甲溪三義斷層帶 3D 點雲模型與立面影像位置示意圖。	. 63
圖	48 后里台地東側與大甲溪中游地質調查結果圖。	. 65
圖	49 大安背斜東翼上福基砂岩圖。	. 66

圖	50	大安背斜南段東翼紅土化階地堆積層與大甲溪溪床魚藤坪砂岩。	67
圖	51	大甲溪溪床十六分頁岩圖。	. 68
圖	52	大甲溪北岸立面影像與地質構造立面分析圖。	. 72
圖	53	大甲溪北岸露頭近 F2 斷層近照。	.73
圖	54	大甲溪北岸空拍影像。	.74
圖	55	大甲溪北岸峭壁面影像。	.74
圖	56	近 F1 斷層峭壁面影像。	.75
圖	57	標本採樣位置與F1分支斷層鄰近區域素描圖。	.76
圖	58	大甲溪北岸採樣露頭上段照片。	.77
圖	59	¹⁴ C 定年校正結果圖。	. 78
圖	60	受剪切作用之砂層。	. 79
圖	61	受剪切作用的砂層。	. 79
圖	62	大甲溪北岸峭壁露頭岸邊。	. 80
圖	63	大甲溪北岸峭壁岸邊出露之青灰色砂岩。	. 80
圖	64	大甲溪北岸峭壁露頭點 A。	. 81
圖	65	大甲溪北岸峭壁露頭點 A。	. 81
圖	66	大甲溪北岸峭壁露頭 B。	. 82
圖	67	大甲溪北岸露頭點 B 青灰色砂岩夾灰白色砂岩。	. 83
圖	68	大甲溪北岸露頭點 B 青灰色砂岩夾灰白色砂岩。	. 83
圖	69	大甲溪北岸峭壁露頭點 C。	. 84
圖	70	大甲溪北岸峭壁露頭點 C。	. 84
圖	71	大甲溪南岸路頭空拍照與露頭近照。	. 86
圖	72	大甲溪南岸露頭立面圖與地電阻剖面 SY23。	. 87
圖	73	大甲溪南岸露頭近照。	. 88
圖	74	大甲溪南岸露頭東側灰色礫石層與黃褐色砂岩交界照。	. 89

圖	75	近大甲溪南岸 F4 主斷層夾於青灰色砂岩中的黑色層間斷層泥。	89
圖	76	近大甲溪南岸 F4 主斷層附近露頭。	90
圖	77	大甲溪溪床新鮮露頭面。	92
圖	78	夾於灰色砂岩中的炭屑與生痕化石。	92
圖	79	黑色層間剪切面。	93
圖	80	黑色層間剪切面和炭屑。	93
圖	81	條帶狀的剪切構造。	94
圖	82	節理截切黑色剪切面。	94
圖	83	地電阻剖面影像。	97
圖	84	剖面 F1-F1'。	99
圖	85	剖面 F2-F2'。	100
圖	86	豐原市區地質鑽井與地電阻影像剖面位置圖。	101
圖	87	斷層擴展褶皺演化圖。	103
圖	88	HL-HL'剖面。	104
圖	89	逆衝斷層帶模型。	106
圖	90	大甲溪三義斷層帶地質構造剖面。	108
圖	91	FY-FY'以及 FY2-FY2'剖面。	111
圖	92	地質構造剖面位置示意圖。	112
圖	93	三義斷層立體圖。	114
圖	94	三義斷層各區段近地表斷層面角度變化圖。	115
圖	95	錦水頁岩頂部等高線與 CPC 井位圖。	117
圖	96	三義斷層各區段之層位落差變化圖。	118
圖	97	¹⁴ C 校正後年代與採樣地點高程比較圖。	119
圖	98	臨大甲溪北岸地形陰影圖與地形剖面圖。	121
圖	99	各版本三義斷層跡和鄰近活動斷層跡。	123

xiv

圖 100 三義斷層鄰近區域 2003-2005 年 GPS 速度場分佈圖。......125

表目錄

表	1 后里台地區域地形面分類表。	.9
表	2 豐原地區地形面分類表。	.9
表	3五萬分之一台灣地質圖大甲圖幅範圍內之地層表。	16
表	4本研究使用之無人飛行載具以及相機規格表。	48
表	5 GPS 靜態測量觀測時間和基線長度比較表。	55
表	6以 GPS 靜態測量之地面控制點測量值和精度表。	50
表	7 已知點一等水準點 B031 檢核表。	51
表	8 各等級水準點應達閉合差表。	51
表	9 DSM 精度檢核表。	53
表	10 地物尺寸測量結果比較表。	53
表	11 各標本 ¹⁴ C 測定年代和校正年代比較表。	71
表	12 地層厚度比較表。1	18
表	13 三義斷層鄰近區域 GPS 連續站速度場資料。12	26

一、緒論

1-1 前言

三義斷層為位於台灣中部西部麓山帶前緣之活動斷層。於民國 87 年, 三義斷層為中央地質調查所公布之存疑性活動斷層,但於民國 97 年,中央 地質調查所根據於苗栗上湖西南方附近之露頭剖面,三義斷層截切紅土化 礫石層,以及大甲溪溪床裸露的土壤層遭斷層截切,改判三義斷層為第一類 活動斷層(林啟文等人,2008)。經濟部中央地質調查所定義活動斷層為過去 10 萬年內活動過,且未來還有可能再活動者,其中第一類活動斷層為過去 10 萬年內活動過,且未來還有可能再活動者,其中第一類活動斷層為過去 10 萬年內活動紀錄者。以民國 88 年集集地震為例,該次地震造成之地表破裂 跡,約 80%為沿著舊有車籠埔斷層的地形崖再次破裂(Ota et al., 2004; Ota et al., 2005);古地震相關研究證實,1900 年內至少發生4 次斷層活動 (Chen et al., 2005);古地震相關研究證實,1900 年內至少發生4 次斷層活動 (Chen et al., 2004),以上研究結果皆顯示詳細的活動斷層調查結果可給予我們量化 的數據評估該斷層的活動性,且依照斷層跡位置劃設活動斷層敏感區,公告 斷層可能影響區域,減少未來斷層活動所造成的災害和損失。

三義斷層北段斷層跡呈現東西走向,於三義呈現直角的轉向,延伸至台 中盆地北緣。據前人報導,三義斷層沿線並無許多露頭能夠佐證其確切位置, 僅於大安溪以北,苗栗西湖附近(林啟文等人,2008)與伯公坑溪發現三義斷 層截切更新世以後之礫石層(李錦發,1994)。大安溪以南,於文獻記載中亦 無甚多露頭點被報導,僅大甲溪北岸,新台鐵山線旁的峭壁露頭(李錦發, 1994;黃鑑水與張憲卿,1994)。此外,豐原地區現已無明顯地形崖或是露 頭等證據,足以判定三義斷層之確切位置。

再者,除了調查三義斷層的位置以外,亦需要了解該斷層之構造特性 (structure characteristics),例如分支斷層位置、斷層活動性、地表變形帶範圍 等,方可有依據評估活動斷層地質敏感區的範圍。然而現階段,有關三義斷

層的構造特性資訊尚有不足,本研利用后里-豐原地區近地表地質、地球物 理資料、經濟部中央地質調查所 103 年度計畫之鑽井資料、無人飛行載具 (unmaned aerial vehicle, UAV)影像測繪及野外地質調查,剖析三義斷層於台 中盆地北緣之地質構造,了解三義斷層於近地表的地質構造特性,作為未來 增修活動斷層敏感區之參考資料之一。

1-2 研究動機與目的

由於近年三義斷層之斷層跡位置有所爭議(圖 1),且根據 Hung & Wiltschko(1993)三義斷層北段剖面和 Yue et al.(2005)三義斷層南段剖面,顯 見三義斷層南北段地下構造有所不同。再者,三義斷層之活動性尚待釐清, 因此本研究將有關三義斷層各段之露頭證據加以彙整,加上后里-豐原地區 所得之地表地質資料、鑽井資料與地電阻資料,劃定三義斷層於后里-豐原 地區更為確切的位置,分析三義斷層各區段(三義-豐原市區)於近地表的構 造特性;以影像測繪之方法製做立面影像,判識大甲溪三義斷層帶分支斷層 的分布範圍。此方法除了詳盡紀錄三義斷層於大甲溪南北岸峭壁露頭之狀 況,成品包含高解析度、高精度的正射影像與 3D 模型,可做為未來三義斷 層再次錯動,研究其同震變形行為的可靠資料;採集岩層標本,以碳十四定 年法,判定大甲溪北岸分支斷層截切的岩層年代,評估斷層帶內分支斷層的 活動性。最後以三義斷層鄰近區域為範圍,針對三義斷層的活動性,做整體 性評估。



圖 1 三義斷層跡與鄰近區域之其他斷層。

二、區域概況

根據中央地質調查所公布的三義斷層條帶地質圖,三義斷層北起於苗 栗三義,南至台中盆地北緣豐原市區,終端與車籠埔斷層合併。而由於三義 斷層跨越大安溪和大甲溪,以及前人研究多集中於大安溪以北,為方便討論, 本研究將大安溪以北歸為三義斷層北段,大安溪以南后里至豐原地區為斷 層南段。本章節首先由前人分析之地形與水系切入,並整合前人研究結果與 現今最新的數值地形與水系圖;接著為三義斷層沿線各地層之岩性描述與 實際照片,以及前人調查之各區段地質構造概況。

2-1 地形與水系

地形發育和地殼活動有密切的關係,地殼活動改變侵蝕基準面,造成各 區域地形有所不同,形成現今複雜地形面(古兆禎,1965)。而今所見複雜地 形面即是地殼活動的各項證據。台灣地區造成地殼活動最大的主因其一是 活動斷層(古兆禎,1965)。活動斷層常在地形上留下痕跡,若於第四紀地層 和地形面察覺異常隆起或傾動的跡象,我們可以藉此辨認活動斷層的位置 (石再添等人,1983)。因此,藉由分析研究區域的地形並整合水系變化,有 助於了解活動斷層可能位置和影響範圍。

三義斷層北部東西走向段截切出磺坑背斜南段,而出磺坑背斜的西翼, 頭嵙山層覆蓋了地表面,且部分被紅土化階地堆積層覆蓋,形成陡峭的豬背 嶺(Hogback)地形;三義地區以南,銅鑼向斜二翼則呈顯較緩的小山丘地形, 且紅土化階地堆積層覆蓋於頭嵙山層之上;三義斷層以北,銅鑼向斜軸部谷 地較為寬廣且走向為近南北走向,但於三義地區以南,向斜軸部谷地變為狹 窄,走向轉為北偏東走向 (Meng, 1963)。此外,於苗栗上湖區域,地形則 呈現疑似壓力脊的地形如圖 2(張瑞津等人, 1998;沈淑敏等人, 2005)。區 域水系部分, Meng(1963)與林朝棨(1957)認為西湖溪北流是受到三義斷層活

動後影響(圖 3); Tang(1969)藉由航照判識, 三義以南為樹枝狀水系, 以北 為格子狀水系(圖 3)。其判識結果顯示北段區域, 岩層抵抗侵蝕能力較平均, 三義以南水系發育則避開強岩層, 下切較軟弱岩層發育。



圖 2 大安溪以北,三義鄰近地區之地形 DTM。構造隆起位置為文中提及的 壓力擠構造(摘自沈淑敏等人,2005)



圖 3 三義斷層沿線水系分區圖。黃色箭頭表示水流方向,紅色色塊為水系 北流區域,其餘色塊為不同之水系盆地。

后里台地區域,前人藉由地形形貌的分析,將后里台地的地形面分類為 若干地形面,並判識斷層的位置與地形的關係(石再添等人,1983;沈淑敏 等人,2005 ;林朝棨,1957)。石再添等人(1983)將后里台地區域地形面分 為屯子腳階地群和磁確階地群二大類群(圖 4、表 1),屯子腳階地群地形地 貌受到屯子腳斷層於西元 1935 年活動所改變,而三義斷層位於屯子腳階地 群之上。比較地形面高度,三義斷層上盤毘廬禪寺面為 LT3 紅土化階地堆 積層,下盤后里面為 LT4,此地形面分類乃比較磁確河階地群地 LT3、LT4 高度相當而因此分類。石再添等人(1983)的地形分析結果,認為三義斷層確 實度屬於第一級(最高級),但其斷層跡已被紅土覆蓋,並無明顯地形變動的 跡象。雖該區域的地形變動不明顯,但陳文山等人(2013)於報告書內發現該 區域疑似為三義斷層活動,造成近地表礫石層呈現彎曲貌,詳見后里台地區 域地質構造章節。

后里台地東側,由坡度陰影圖顯示,地形面些微的向西傾斜。二條主要 溪流為北邊乾溝,南邊牛稠坑溝(大甲溪支流),以上二者發育於后里台地東 側山麓地區(圖 44)且為樹枝狀水系向西流。而牛稠坑溪鄰近的地形,因溪流 下切該區最上層的紅土階地堆積層,造成地形面的缺口(圖 5)。牛稠坑溝南 側為大甲溪主流,為東西流向。此外,位於豐原市區東側的山麓地帶,北起 旱溪、烏牛欄溪、二重溪,於山露地區皆為樹枝狀水系,且向西匯流至台中 盆地,水流至平原區後,轉為向南匯流。

此外坡度陰影圖顯示,大甲溪的階地面雖然高程差異小於10公尺,但 可約略分為4個河階面。最老的河階面為於豐原市區南側(Ft1)高程最高248-212公尺; Ft2為第二高河階面215-182公尺; Ft3為214-173, Ft4則為現今 的大甲溪河階面(圖 5、表 2)。然而綜觀大甲溪主流以南至豐原市區的河 階面,無發現階地面因三義斷層活動形成的傾動地形面。



圖 4 后里台地之地形面與地形剖面。Lh 表紅土化高地,數字越大表較高之 地形面;Lt1~Lt5 表示紅土化階地各地形面高程;Ft 表河流沖積階地,數字 同樣為地形面高程。詳細地形面分類請參閱表1以及內文(改自石再添等人, 1983)。

屯子腳階地群	Lt3	毘廬禪寺面	ā
	Lt4	后里面	
磁磘階地群	LH	月眉面	鐵砧山面
	Lt1	三崁面	國姓廟面
	Lt2	二崁面	尾山面
	Lt3	磁硌面	
	Lt4	內水尾面	內水尾西面
	Lt5	馬鳴埔面	外水尾東面
	FT	山腳面	頂店東面

表 1 后里台地區域地形面分類表。(改自石再添等人, 1983)

對比

地形面

表 2 豐原地區地形面分類表。

地形區

未紅土化階地面分類	絕對高程(m)
Ft1	248-212
Ft2	215-182
Ft3	214-173
Ft4	<173



圖 5 豐原地區地形面分類。

2-2 地質概況

三義斷層北段(大安溪以北),斷層上盤出露一系列中新世晚期至上新世 的地層,由老至年輕為東坑層(Te)、上福基砂岩(Sf)、桂竹林層(Kc)、錦水頁 岩(Cs)、卓蘭層(Cl)和頭嵙山層(Tk);斷層下盤則為更新世頭嵙山層或是更 年輕的階地堆積層。前人研究多集中三義斷層北段(Hung & Wiltschko, 1993; Meng, 1963),以當時的地表地質資料、鑽井資料以及震測剖面等地球物理 資料剖析三義斷層北段的地下構造分布,並討論其可能的演化順序。三義斷 層南段大安溪以南,斷層上盤覆蓋著紅土台地堆積層和中新世晚期的桂竹 林層,二者為不整合接觸,斷層下盤為階地堆積層或是紅土台地堆積層。近 年的研究多著重於此后里-豐原地區的調查與研究(李錦發,1994;黃鑑水與 張憲卿,1994;林啟文等人,2008;陳文山等人,2013)以下將分段描述前 人對於此區域地層、露頭的報導以及地質構造判識結果。



圖 6 三義斷層鄰近區域地質圖。(改自張憲卿,1994;何信昌與陳勉銘,2000; 李錦發,2000;羅偉等人,2000)

2-2-1 地層

首先簡述前人調查之三義斷層沿線區域,各地層的岩性描述等資訊。以 下摘自經濟部中央地質調查所五萬分之一台灣地質圖第十七號大甲圖幅說 明書(張憲卿,1994)。

(1) 東坑層(Te)

本層標準地位於苗栗縣後龍溪岸東坑,本層常見於西部麓山帶,上覆上福基 砂岩且為整合接觸。本層出露於三義斷層北段上盤,而至南段后里地區則無 明顯出露於地表,僅於鑽井資料中見得東坑層之上覆蓋河流堆積物。本層為 淺灰色細粒砂岩與深灰色頁岩互層,層間夾煤層,但於大甲圖幅說明書所示, 圖幅範圍內的東坑層並無煤層,僅發現煤跡以及碳物質。此外本層含有海相 有孔蟲與貝類化石。

(2) 上福基砂岩(Sf)

本層標準地點位於苗栗縣後龍溪岸福基附近。上福基砂岩相當於南莊層的 上段,主要由白色砂岩組成,但於后里豐原地區以灰白色或黃白色砂岩,出 露於大安背斜兩翼,於大甲圖幅內厚度約為80-150公尺厚。本層下伏東坑 層,上覆桂竹林層-關刀山砂岩段,階為整合接觸關係。

(3) 桂竹林層(Kc)

本層最早為鳥居敬造與吉田要於西元 1931 年命名,標準地點為後龍溪南岸 桂竹林一帶。桂竹林層整合伏於錦水頁岩之下,亦整合覆蓋於上福基砂岩之 上,屬於中新世晚期至上新世晚期的地層。本層由淺海相的青灰色泥質砂岩、 灰色至灰白色砂岩和頁岩或砂質頁岩組成。苗栗-台中地區可自下至上層分 為關刀山砂岩段、十六分頁岩段、魚藤坪砂岩段。以下將由下層至上層介紹 各岩段。

1. 桂竹林層-關刀山砂岩段(Kck)

本岩段為林朝棨於西元1935年命名,標準地點位於苗栗縣關刀山附近,本

岩段為桂竹林層下岩段,由細粒至中粒的淡青灰色泥質砂岩組成,時含有煤線以及煤塊,砂岩常造成陡壁,於大甲圖幅區域內地層厚度約 180 公尺。 (圖 7)

2. 桂竹林層-十六分頁岩段(Kcs)

本岩段為張麗旭、何春蓀於西元 1948 命名,標準地點位於苗栗三義以南十 六分,為桂竹林層的中段,於大安背斜東翼出露的本岩段發育良好(張憲卿, 1994),也出露於大甲溪畔。本岩段主要以深灰色頁岩組成,局部夾砂岩(圖 8),含有孔蟲以及貝類化石。於大甲圖幅範圍內本岩段厚度約 120 公尺。

3. 桂竹林層-魚藤坪砂岩段(Kcy)

本岩段為林朝棨於西元1954年命名,標準地點為苗栗縣魚藤坪,為桂竹林 層的最上段,出露於大甲溪畔近台鐵舊山線鐵橋。本岩段由淺灰至灰、細到 中粒、中至厚層的砂岩組成,砂岩中常含泥質,偶爾出現煤塊,本岩段於大 甲圖幅範圍內厚度約180公尺。

(4) 錦水頁岩(Cs)

本層為安藤昌三郎於西元 1933 年命名,標準地點位於苗栗縣錦水,分布於 豐原市大甲溪以東。主要以深灰色頁岩為主,夾薄層粉砂岩與泥岩,厚度約 180 公尺,與下段之桂竹林層魚藤坪砂岩段整合接觸以及上層卓蘭層整合接 觸。

(5) 卓蘭層(Cl)

鳥居敬造於西元 1935 命名,本層分布於西部麓山帶中,由青灰至淺灰色砂 岩、粉砂、青灰色至暗灰色泥岩和頁岩組成。於台灣北部一般出露總厚度約 2000 公尺,但於圳頭國小一帶厚度約 110 公尺;公老坪一帶約 600 公尺厚。 本層整合下伏於頭嵙山層之下。

(6) 頭嵙山層

本層由林朝棨於西元1933年命名為頭嵙山層群,而後再將頭嵙山群分為上、

中、下三層,稱為頭嵙山統,而後於 1948 年張麗旭則於地層比對表首次使 用頭嵙山層命名。本層標準地位於台中市豐原區東方頭嵙山,包含礫岩和砂、 頁岩兩大類。西元 1955 年,張麗旭將其分為火炎山相和香山相。

火炎山相主要由礫岩組層,層間夾厚約2公尺左右的砂、頁岩互層,礫石的 直徑大約以10-30公分佔多數,且多為橢圓形,淘選度良好,但膠結物多為 粗砂或是細礫岩,膠結較鬆散(圖 9)。火炎山相厚度約780公尺。

香山相砂岩主要由淺灰至青灰色泥質砂岩、粉砂岩和砂岩、粉砂岩、頁岩互 層以及偶夾細礫岩組成。礫岩膠結鬆散,層理不明顯,含碳化漂流木以及海 棲化石。較厚的砂岩分布於本層的中下段,頁岩、泥質砂岩則分布於本層的 中上段。本層厚度約 1200 公尺。

(7) 紅土階地堆積層

本層紅土呈現紅棕色,厚度約1-6公尺,且夾礫石層,厚度約30-80公尺, 淘選度極差,粒徑約10-20公分甚至達1公尺。本層不整合接觸頭嵙山層之 上。(圖10)

(8) 階地堆積層

本層出露於各河流主流與支流的兩岸,為不含紅土的晚更新世至現代礫石 堆積物,由黏土、粉砂、砂、礫石等膠結較差的地質材料組成。礫石以第三 紀岩屑質砂岩以及石英砂岩為主,粒徑由幾公厘至公尺等級。而本層因地殼 抬升做用,屢次改變河流侵蝕基準面形成,本區依不同的上升高度可分為三 階,分別高於河面 1-3 公尺,8-12 公尺,20-25 公尺等,且均不整合覆蓋於 第三紀晚期或第四紀地層之上。

表 3 五萬分之一 台灣地質圖 大甲圖幅範圍內之地層表。(摘自 張憲卿, 1994)

時代	地	屠	柱狀圖	岩	性	厚度公尺	化石
全 新 世	沖積	唐 (a)	0 0 0	礫石、砂、 黏土	、粉砂、	1-5	
更	腊地	堆積層 (t)		礫石、砂、 及黏土	粉砂	1-25	
新	紅土 堆積	台地 骨 (1)		砂、泥及鸡 覆一至六公	*石・上 、尺紅土	30-80	_
世	頭料(山層(礫 岩 TK2 砂、頁岩		TK2 :礫 夾薄層泥質 TK1 :砂 砂岩、頁岩	岩間 間砂、岩 子 子 日 子 名 子 名 子 名 子 名 子 子 名 子 子 名 子 子 名 子 子 ろ 子 ろ	1,980	貝類、有孔虫 、鮮虫、哺乳 類及珊瑚等
	卓蘭	骨 (CI)		砂岩、粉砂 泥岩與頁岩	治、 互層	710	炭化漂木、貝 類、有孔虫及 海膽等
上	錦水頁岩 (Cs)		<u> </u>	頁岩央砂岩 ,薄層粉砂	凸鏡體 及泥岩	180	蟹類、腹足類 、斧足類、有 孔虫類、珊瑚
新	桂	魚藤坪 砂岩 (Kcy)		砂岩、泥質 粉砂質	及	180	有孔虫、貝類 、 蟹類
世	竹林	十六份 頁岩 (Kcs)		頁岩		120	R
ф.	層	關刀山 砂岩 (Kck)		砂岩夾薄層	頁岩	180	11
新	上福基砂岩 (Sf)			灰白砂岩或 岩,央頁岩	黄白砂 薄屑	80- 150	貝類、有孔虫
世	東坑	Te)		砂岩、頁岩 層 , 含少許, 岩	之 <i>薄互</i> 炭質頁	250	n



圖 7 桂竹林層關刀山砂岩段。攝於大甲溪南岸,台鐵橋下方。



圖 8 桂竹林層十六分頁岩段。攝於大甲溪南岸。



圖 9 頭嵙山層火炎山相礫岩。攝於火炎山。



圖 10 紅土階地堆積層。攝於后里台地東緣。

2-2-2 大安溪以北至三義地區地質構造

綜觀 20 世紀至今各方學者的研究與報告,三義斷層的由來最早可追溯 至西元 1935 年新竹-台中大地震後,日本在台學者丹桂之助及大塚彌之助分 別調查中部當時災害區域,皆於報告中提及「三叉衝上斷層」(為現今三義 斷層東西走向段),認為此斷層為低角度上衝斷層,自三義地區算起,為東 西走向且長約4公里,並截切出磺坑背斜,且於出磺坑背斜軸部漸減。張麗 旭(1951),即針對「三叉衝上斷層」附近區域加強調查,以自砂岩層為指準 層追跡,發現不只出磺坑背斜西翼遭斷層截切,背斜軸東翼之白色砂岩層亦 遭到截切,證明三義斷層存在背斜軸東翼並未消滅。Meng(1963)則於文中將 南北走向的銅鑼斷層與張麗旭(1951)提出之東西走向三叉上衝斷層合而為 一,稱為「三義斷層」斷層跡於三義地區呈現近乎直角的轉向,並向南延伸 至台中盆地北緣與車籠埔斷層連接。

而後 Hung & Wiltschko(1993)根據地表地質資料、鑽井資料、震測資料, 建立三義地區的地質構造剖面,並推演三義斷層和出磺坑背斜的發育順序。 各剖面的位置如圖 11,南北走向 A-A'剖面橫跨卓蘭-大湖地區,三義斷層 傾角約 65°發育於出磺坑層底部,桂竹林層於斷層上盤出露(圖 12);另一南 北走向 B-B'剖面顯示三義斷層由東坑層的底部發育,約以 18°低角度上衝 切穿地表,使東坑層逆衝至頭嵙山層之上(圖 13);C-C'剖面為東西向的剖 面橫跨三義斷層以及其他於上盤的斷層,其顯示三義斷層於近地表 1 公里 處轉為低角度逆衝,東坑層(Te)上衝至頭嵙山層(Tk)或更年輕的階地堆積層 之上,而位於東側的分支斷層上盤出露東坑層與桂竹林層(Kc),於東坑層間 錯動,相較西側主斷層錯移量較小(圖 14)。

由 A-A'、 B-B'、 C-C'和 D-D'剖面,顯示三義斷層北段區域,地下構造由東至西側變化顯著。大湖地區(A-A')抬升量較三義地區(B-B')小,斷層傾角從約 65°轉為約 18°低角度逆衝。C-C'和 D-D'剖面的斷層傾角約 20°(圖

13、圖 14),上盤出露東坑層,下盤為頭嵙山層。此外,近西側三義地區, 三義斷層與魚藤坪斷層所圍起的地塊,三義斷層上盤則發育一系列近南北 走向的褶皺(圖 11),且褶皺軸走向沿著斷層變化,顯示該區域地塊受到擠 壓的情形顯著,三義斷層扮演重要的角色(李錦發,1994)。

林啟文等人(2008)於文中提及於苗栗上湖西南方附近(前人所繪主斷層 以東約400公尺,十六分斷層下盤,圖11,P點),發現一開挖露頭岩層 折曲,且露頭面有明顯剪切構造,經判定為三義斷層的分支斷層。斷層上盤 出露白色砂岩組成之上福基砂岩且覆蓋一層紅土,該岩層明顯受到斷層擾 動,呈現折曲貌;下盤為紅土化礫石層(圖17、圖18)。露頭面所觀察到二 斷層:西側斷層,上盤為上福基砂岩,下盤為紅土化階地礫石層,剪裂帶寬 度約40-90公分,錯距約3公尺,斷層位態N24°E/62°S;東側斷層,上下 盤均為上福基砂岩,斷層泥厚度約2公分,錯距1公尺,斷層面位態 N30°E/48°S。

而苗栗上湖西南方之露頭位置,再依地形崖向南沿延伸,可連至伯公坑 溪露頭。李錦發(1994),認為伯公坑溪露頭的拖曳褶皺,是受到三義斷層的 逆衝作用所造成,且斷層上盤為南莊層(等同中部的上福基砂岩和東坑層), 而下盤為頭嵙山層(圖 19、圖 20)。林啟文等人(2008)總結大安溪以北的野 外調查結果,判定三義斷層上盤有分支斷層,且破損帶(fault damage zone)的 範圍可能超過 400 公尺。

有關三義斷層的演育 Meng(1963)整合了當時前人的研究結果,推斷三 義斷層乃沿著河排層(Hp,上福基砂岩、東坑層和觀音山砂岩合稱)的底部朝 向西北方發育,斷層發育的中晚期,不斷的和前緣的地塊擠壓,斷層前緣於 現今苗栗三義地區受阻,而最終產生現今直角狀的斷層跡出露於地表。而斷 層跡於各發育階段的位置和發育方向如圖 21 所示,由初至現今順序為b至 e。三義斷層大安溪以北的演化模式亦可由地質剖面解釋其各階段的發育狀
態(圖 22), Meng(1963)將三義斷層的發育分為四個階段:

(1)第一階段

破裂產生,由最底層的河排層(HP,現今之東坑層)延伸至頂層頭嵙山層(Tk)。 而破裂深度達 3000 公尺深至河排層底部(圖 22(a))。

(2) 第二階段

由於斷層持續發育,造成上盤和下盤地層變形扭曲,而於斷層面上的河排層 則沿著斷層面一同向西北方抬升(圖 22(b))。

(3) 第三階段

由於斷層上盤持續朝西北方擠壓下盤,使得本區的地層無論上盤下盤持續 的變形。但由於斷層前緣受阻,前緣地層的變形漸漸變少(圖 22(c)、(d))。 (4)第四階段

斷層發育的同時,地表亦同時遭到侵蝕。而位於較上層的年輕地層則因為侵 蝕作用而消失殆盡,取而代之出露的是較老的地層(桂竹林層,Kc),而成為 現今我們所看到的地形樣貌和地質構造剖面(圖 22(e))。



圖 11 三義斷層大安溪以北地形陰影圖與剖面位置圖。紅線為三義斷層;V5 為震測剖面位置(對應 D-D'剖面);A-A'、B-B'、C-C'以及 D-D'剖面詳細參 見下頁圖(改自 Hung & Wiltschko, 1993)。



圖 12 三義斷層北段 A-A'剖面。位置請參照圖 10。Hung& Wiltschko (1993) 認為三義斷層 (Sanyi fault)與小南勢斷層 (Hsiaonanshih Fault)發育於同一深度, 斷層傾角約 65°,將桂竹林層 (Kc) 推至地表 (改自 Hung & Wiltschko, 1993)。



圖 13 三義斷層北段 B-B'剖面。剖面位置請參照圖 10。本剖面顯示三義斷層以 18°低角度逆衝至地表,截切更新世頭嵙山層(Tk),將中新世東坑層(Te) 推至地表(改自 Hung & Wiltschko, 1993)。



圖 14 三義斷層北段 C-C'剖面。位置請參照圖 10。剖面顯示本區三義斷 層最前緣呈現低角度逆衝,前緣斷層傾角約 20°,且上盤有分支斷層(改自 Hung & Wiltschko, 1993)。



圖 15 三義斷層北段 D-D'剖面。該剖面根據 V5 震測剖面、地表地質、地 質鑽井資料判識所得,顯示於后里台地北緣的東側,三義斷層以約 20°低角 度逆衝,將東坑層推至地表截切下盤更新世頭嵙山層(改自 Hung & Wiltschko, 1993)。



圖 16 跨三義斷層之震測剖面。地質剖面解釋請參照圖 15。對照圖 10 位置,可見得 V5 剖面西側的岩層呈現折曲貌,即為銅鑼向斜的位置(摘自 Hung & Wiltschko, 1993)。



圖 17 苗栗上湖西南方,三義斷層分支斷層露頭。位置請參照圖 10 左上 P 點(摘自林啟文等人,2008)。



圖 18 苗栗上湖西南方, 三義斷層分支斷層露頭判識圖。圖中紅線為判識的 斷層位置, 西側(圖右側)斷層錯距3公尺; 東側(圖左側)斷層錯距1公尺(摘 自林啟文等人, 2008)。



圖 19 三義斷層伯公坑露頭。圖中顯見褶皺構造(摘自李錦發, 1994)。



圖 20 三義斷層伯公坑露頭判識圖。上盤東坑層岩層呈現褶皺貌,斷層並未 切穿至地表,西側為頭嵙山層或崩積層(摘自李錦發,1994)。



圖 21 三義斷層北段構造演化順序圖。b、c、d和e表示各階段三義斷層於 地表的斷層跡形貌以及位置,而各階段斷層於地下的形貌則表示於 w-w'剖 面以及圖 21(改自 Meng, 1963)。



圖 22 三義斷層北段構造演化剖面圖(改自 Meng, 1963)。

2-2-3 大安溪以南后里-豐原地區地質構造

近年有關三義斷層的地質調查,多著重於南段后里-豐原區域(李錦發, 1994;黃鑑水與張憲卿,1994;林啟文等人,2008;陳文山等人,2013), 三義斷層之斷層跡可能被紅土化階地堆積層所覆蓋,且由地形地貌分析得 知后里台地東側並無明顯因斷層錯動造成的地形崖。因此僅能以地球物理、 地質鑽探或是少數的野外露頭了解近地表之地質構造。以下將簡述前人對 於此區域的露頭報導與判識的結果。

(1)后里台地東側

陳文山等人(2013),利用聯合大地工程的鑽井、槽溝開挖和地形資料, 判定后里台地東側,三義斷層支斷層-后里斷層近地表的構造特性。鑽井位 置、槽溝位置和地質剖面位置如圖 23 所示。槽溝位於后里馬場西北側之崖 腳,崖坡高約20公尺,槽溝寬40公尺,深6公尺。槽溝剖面,上盤紅土化 礫石層遭斷層截切,下盤為紅土所組成(圖 24、圖 25),而紅土化礫石層與 紅土層皆無發現沉積構造足以判定層面方向,且由槽溝南北牆剖面判識,后 "里斷層於該位置並未切穿地表,僅造成上盤紅土化礫石層變形。而此槽溝地 表面之地形崖位置與現今所繪的后里斷層跡位置相差約20公尺,顯示地形 崖可能已向東後退。此外,陳文山等人(2013)藉由鑽井資料繪製地質剖面, 認為於后里台地東側的后里斷層,斷層傾角界於 40 至 50 度(圖 26 至 28)。 D-D'剖面(圖 29), 斷層位置應在兩鑽井 HL-01 和 101-TF-15 之間, 僅能判 定斷層跡可能的範圍。而位於后里台地東側,后里斷層上盤的鑽井資料顯示, 青灰色砂岩組成的桂竹林層之上覆蓋著礫石層,二者為不整合接觸關係。而 由以上鑽井資料以及槽溝開挖資料,顯示三義斷層分支斷層-后里斷層主控 近期構造運動所造成的地表變形。三義斷層主斷層則經推測,可能之位置繪 於后里斷層西側(陳文山等人,2000)。



圖 23 后里台地東側鑽井位置、槽溝和剖面位置圖(摘自陳文山等人,2013)。



圖 24 后里 2 號槽溝北牆剖面照片與判識圖。黃色部分為紅土層, 灰綠色 為紅土層夾礫石。經判識, 認為斷層的位置如紅色虛線所示, 造成近地表的 紅土礫石層擾動變形, 且斷層未切穿地表(摘自陳文山等人, 2013)。



圖 25 后里2號槽溝南牆剖面照片與判識圖。黃色部分為紅土層,灰綠色為 紅土礫石層。經判識,與北牆構造相似,近地表的紅土礫石層受斷層擾動變 形,且斷層未切穿地表(摘自陳文山等人,2013)。



圖 26 后里台地東側 A-A'剖面。比對鑽井資料以及地形面,三義斷層傾角 可能約43度,且上盤桂竹林層上覆晚更新世礫石層(摘自陳文山等人,2013)。



圖 27 后里台地東側 B-B'剖面。比對鑽井資料以及地形面,三義斷層傾角 可能約48度,且上盤桂竹林層上覆晚更新世礫石層,斷層未截切紅土礫石 層(摘自陳文山等人,2013)。



圖 28 后里台地東側 C-C'剖面。由槽溝開挖結果以及鑽井資料分析,三義 斷層於該剖面傾角約 50 度,且截切部分紅土礫石層(摘自陳文山等人,2013)。



圖 29 后里台地東側 D-D'剖面。由於鑽井資料較淺且無鄰近的槽溝開挖做 為控制點,因此僅能推斷三義斷層前緣位於 HL-01 和 101-TF-15 井之間, 且斷層已被紅土礫石層掩覆(摘自陳文山等人, 2013)。

(2)大甲溪北岸峭壁露頭

此露頭位於后里台地南緣,為西元 1993 年台灣鐵路公司截彎取直工程 開闢新路線之隧道口位置。該露頭最早由李錦發(1994)和黃鑑水與張憲卿 (1994)同時於地質期刊內報導。黃鑑水與張憲卿(1994)以手持相機拍攝露頭 面,並繪製素描分析該片露頭的構造。圖 30 中可見前鋒斷層(frontal flexure and thrust)截切紅土礫石堆積層,而隧道口右下方發育拖曳褶皺。該前峰斷 層露頭照片也能見於地調所五萬分之一大甲圖幅說明書,顯見斷層確實截 切岩層(圖 32,張憲卿,1994)。李錦發(1994)於隧道東側,拖曳褶皺層間發 現斷層擦痕和斷層泥(圖 31,a、b 位置),其認為該拖曳彎曲的岩層為逆衝 斷層做用造成,斷層下盤岩層受到推擠,應力向斷層下盤傳遞的結果,三義 斷層主斷層位置於該立面圖的最東側(圖 31 東側)。而於鐵道西側之溪床, 劉彥求與李奕亨(2006)發現斷層截切溪床上的紅土礫石層和土壤層,其中 SF5 斷層垂直錯距約 50 公分(圖 33),顯示三義斷層在全新世可能活動過, 因此於民國 97 年(西元 2008 年)於報告書內正式將三義斷層由存疑性活動 斷層,改為第一類活動斷層(林啟文等人,2008)。

總結以上地質構造資訊,除了三義斷層南、北段上盤出露最老地層相異 外,陳文山等人(2000)、Chen et al.(2003)所提出三義斷層與后里斷層跡位置 與 Meng(1963)、林啟文等人(2008)所繪的三義斷層跡位置於大安溪以南明 顯不同,且對於三義斷層的定義有所分歧,而本研究即針對該區域,后里-豐原地區三義斷層之近地表地質構造特性,進行分析與討論。





圖 30 大甲溪北岸露頭構造判識圖。圖的左側(西側)為前鋒斷層,近照可參 考圖 31(摘自黃鑑水與張憲卿, 1994)。



圖 31 大甲溪北岸露頭構造判識圖。於隧道口附近 a、b 點發現剪切構造和 斷層泥於岩層中,且隧道口右下方有拖曳褶皺,可能為前鋒斷層活動所造成 (摘自李錦發,1994)。



圖 32 大甲溪北岸,台鐵隧道西側露頭。D 為判識之斷層位置,為逆斷層(摘 自張憲卿,1994)。



圖 33 大甲溪溪床分支斷層 SF1-SF5。分支斷層 SF5 截切紅土礫石層和土壤 層(摘自梁勝雄與陳建良, 2016)。

三、 研究資料

3-1 LiDAR 地形陰影圖

自西元 2010 年起,經濟部中央地質調查所委託民間測繪公司,以空載 光達(Airbone LiDAR)製作1米網格之數值高程模型(Digital elevation model, DEM),呈現近乎原始的地表形貌,應用於地質敏感區調查分析、地形及水 系特性分析、地質災害潛勢評估等(侯進雄等人,2014)。本研究則藉年度活 動斷層調查計畫,申請使用該 DEM,以地理資訊系統軟體 ArcGIS 生成地 形陰影圖,做為地形判釋之用。

3-2 鑽井資料

本研究取得中央地質調查所 103 年三義斷層補充鑽井資料,一共 10 口 鑽井資料,位置如圖 35、圖 36、圖 37 所示,北起大安溪,南至豐原市區, 其中二口井為 100 公尺深井,其餘為 50 公尺深,詳細井錄內容請參見附錄。 此外,亦整合陳文山等人(2013)地調所報告內的鑽井位置,同時標示於鑽井 位置圖中(圖 35 至 37)。

3-3 豐原市區地電阻影像

(1)地電阻調查原理:

不同種類的地質材料,由不同的岩石礦物組成。而岩石礦物組成、膠結程度、 孔隙率、與含水量,都有可能影響該地質材料的導電特性。導電特性常以電 阻率(Resistivity)表示之。而地電阻調查,即是利用地下岩層有著不同的導電 特性,先以一電極施以直流電(直流地電阻法),於淺地表製造人工電場,並 再施以另一接收端電極,測量該接收端電極(MN)的電位差(圖 34)。而在該 組電極排列下,取得的電位差資料經計算稱為視電阻率。但由於視電阻率僅 表示在該電極排列下,所有小於該接收端電極測深的視電阻率,因此必須再 利用視電阻率資料,逆推求得測線地下的真實電阻率。



圖 34 地電阻調查電極排列示意圖。紅色 A、B 為電流極製造地下電場; 藍 色 M、N 為接收端電極,可測得電位差,再經計算可得視電阻率。

(2)地電阻調查方法:

而由於不同目的所需的測量寬度、測深和解析度不同,可以將地電阻調查方 法可簡單分為垂直地電測深法(Virtical electrical sounding method)、剖面地電 阻法(Profililing resistivity method)、地電阻影像剖面法(Resistivity image profiling method)、三維地電阻法(3D Resistivity method)等。各式的地電阻調 查方法可依照不同電極排列方式進行施測,常見的電極排列方式有雙偶極 排列(Dipole-dipole Array)、雙極排列(Pole-pole array)施蘭卜吉排列 (Schlumberger array)和溫奈排列(Wenner array)等。本研究所取得的資料為地 電阻影像剖面法所得之地電組剖面影像(Electrical resistivity image),該調查 方法並無限定電極的排列方式,但常使用雙極排列(Pole-pole array),優點在 於可測得較廣的範圍以及較深的測深。反演後的影像若再搭配地質鑽井、野 外露頭或是水井資訊,即可以較快速、低成本之方式,了解地下的地質材料、 地下水或是汙染物的分布。本研究取得 104 年度經濟部中央地質調查所委 辨計畫「重要活動斷層特性調查-活動斷層近地表構造特性調查二期」之地 電阻調查資料,並整合鑽井資料以及野外露頭資料,判釋斷層位置。



圖 35 后里-豐原地區鑽井位置以及地電阻測線位置圖。



圖 36 后里-豐原地區鑽井位置以及地電阻測線位置圖(續圖 35)(本影像經由 經濟部中央地質調查所提供之空載光達數值地形資料產製)。



圖 37 后里-豐原地區鑽井位置以及地電阻測線位置圖(續圖 35)(本影像經由 經濟部中央地質調查所提供之空載光達數值地形資料產製)。

四、 研究方法

4-1 地質剖面繪製方法

(1)急折法(Kink method)

於近 20 年,構造地質學家於褶皺逆衝帶(fold-thrust belt)發現許多褶皺 的二翼呈現筆直的形貌,且樞紐軸(hinge)角度明顯銳利,而根據以上觀察所 得地下構造幾何形貌,假設褶皺兩翼之岩層傾角,由平均的岩層傾角所主控, 僅於樞紐軸部繪出轉折點,於構造剖面顯示銳利的樞紐軸和筆直的岩層。

然而樞紐軸的位置則可因為兩側岩層厚度相同或是相異,而有不同的 繪製方式,以下將分開討論其繪製方法:(改自 Marshak & Mitra, 1988)

1. 岩層厚度相等:

於相鄰地層傾角延伸線的交點劃設樞紐軸,圖 38(a)為野外調查後所得的地 表岩性、岩層位態和地形。首先我們先將 Sh 岩層的邊界依傾角 B 和傾角 C 的方向延伸,再於二傾角延伸線的交點做角平分線 Hinge1 如圖 38(b)所示, 繪出 Sh 地層。接著我們利用傾角 A 和 B 做地層邊界的延伸得 Hinge2,並 繪出 Ss 地層,而其餘地層的交界則依照地層的傾角和 Hinge 的位置繪製, 最終得圖 38(c)。

2. 地層厚度不相等:

此外,假設同一岩性的岩層,於樞紐軸(hinge)二側的厚度不同,則有以下關係式:

$$\frac{T}{\sin\gamma} = \overline{OO'} = \frac{T'}{\sin\gamma'}$$

T和T'為褶皺兩翼岩層的厚度為已知,γπγ'是未知數μγ + γ'為已知,我們可以用三角函數 合角公式sin $(a \pm b) = sin a cos b \pm cos a sin b 求得岩層和 hinge 的夾角<math>γ, γ'$ 。接著再重複(b)和(c)的步驟,根據相鄰岩層的位態將地下

構造繪出。



圖 38 以急折法繪製地質剖面步驟示意圖。(a)為地表岩性和位態資料;(b) 為依照岩性分布和位態將相鄰岩層連起並繪出該層(Sh)厚度;(c)將調查區域 內所有的岩性資訊和位態資料依序繪出之完整示意圖;(d)在岩層不等厚的 情況下,於褶皺軸附近之地層示意圖。(摘自 Marshak & Mitra, 1988)

4-2 地層定年-碳十四定年法

在自然界中,主要存在三種碳同位素,¹²C、¹³C、¹⁴C。其中¹²C、¹³C為 穩定的同位素,¹²C於自然界所占百分比為 98.89%,¹³C占 1.11%;¹⁴C為具 放射性的放射性碳(radiocarbon),於自然界中僅占 0.00000000010%(一兆分 之一)。而¹⁴C為不穩定的放射性同位素,半衰期約為 5730 年,意即需要很 長一段時間才會完全消失。而放射性碳定年法則是根據不穩定的¹⁴C 同位素 含量,判定待測動物、植物的死亡年代或是岩層中有機物的生成年代。 (1)基本原理

¹⁴C來自於高能量的宇宙射線和地球大氣層中的氮(¹⁴N)反應所產生,當這些 宇宙射線中子(¹n)撞擊上層大氣層內的氮,即有以下化學反應:

${}^{1}_{0}n + {}^{14}_{7}N \rightarrow {}^{14}_{6}C + {}^{1}_{1}H$

而¹⁴C則再與大氣中二氧化碳(CO₂)反應,以¹⁴CO₂的形式分布於大氣層之中, 並透過大氣循環、光合作用、食物鏈進入生物體之中。直至生物體死亡成為 有機物,¹⁴C的循環才停止,且因衰變含量逐漸減少,我們利用此點計算¹⁴C 的含量推測生物體死亡或是有機物沉積的年代。

(2)半衰期

¹⁴C 的半衰期,最早於西元 1949年,Libby、Anderson 和 Arnold 測量所得。 他們的研究發現,含有¹⁴C 的樣品在過了 5568年後,原先存在於樣品中的 ¹⁴C 含量減少一半。而 Libby 之團隊再次測量後得到 5568±30年¹⁴C 含量減 半的週期,而此半衰期值為 Willlard Libby 團隊首先提出,後人則名為「利 比半衰期」(Libby half-life)。而後又有團隊測量出更準確的「劍橋半衰期」 (Cambridge half-life)為 5730±40年,但現今實驗室大多繼續使用利比半衰期 的數字避免混淆。二者所計算的年代差異量可達 2.9%。此外年代簡稱「距 今年代」(Before present, BP),為西元 1950年為基準(零年)算起。然而,經 過十次半衰期的時間後,物質內所殘留的放射性已微乎其微,因此以 ¹⁴C 做 為定年之方法,至多可測得大約介於 50,000-60,000年間的年代,若是老於 此年代的樣本需要定年,則須以其他更精密之測量輻射量方法進行定年研 究。

(3)實驗方法-標本採集

凡是含有碳的物質,均可透過碳十四定年法測定年代。但由於¹⁴C 於自然界 中的含量極少,且一般需要 4-5 克的碳,而大部分採集到之標本還需經處裡 洗淨過程,因此標本採集量需稍多(劉聰桂,1997)。採集之標本應防止受到 外界汙染,手汗或是鄰近樹根區域的標本採集更需特別注意。此外,採集後 須標示採集地點、土層位置、環境描述等等紀錄之。

(4)實驗方法-標本預處理

由於¹⁴C標本大多長年埋於地底下,受到微生物侵蝕、地下水滲透,與許多 不同年代的物質有著碳原子的交換。因此¹⁴C年代是否可靠,取決於標本是 否保留原有的碳原子(劉聰桂,1997)。而標本的處理方式一般先去除雜質, 再以酸鹼化學物質處理清除標本內的碳酸鹽或是腐植質。

(5)實驗方法-標本製備

先將標本內含的雜質去除以外,為特別提煉出標本內的碳物質(石墨, Graphite),以利 AMS 法儀器測定¹⁴C 的含量。

1. CO2 產製

首先將標本內的有機物質(Organic)以燃燒法(combustion)氧化生成 CO₂,或 是酸水解法(acid hydrolysis),以氧化銅(CuO)直接與標本內的有機物反應生 成 CO₂,而二者的反應式如下:

Organic + O_2 + $\Delta H \rightarrow CO_2(Carbonate)$ + $H_3PO_4 \rightarrow CO_2$

Organic + $CuO + \Delta H \rightarrow CO_2$

而生成之 CO₂ 則再以低溫法(cryogenically purify)通過乾冰等低溫狀態下, 移除水氣和其他不相關的氣體。

2. CO₂轉換生成石墨(Graphitization reaction)

緊接著我們使用 Bosch 反應法(Bosch reaction)產製碳元素。而此反應法亦會 產生熱和水。然而此反應是綜合二不同的反應接續完成的,首先為水煤氣反 應(water-gas reaction):

 $CO_2 + H_2 \rightarrow CO + H_2O$

再者為:

 $CO + H_2 \rightarrow C + H_2O$ 綜合以上二反應,可得反應如下: $CO_{2(g)} + 2H_{2(g)} \xrightarrow{CO} C_{(s)} + H_2O$ (6)實驗方法-標本測定 分析 ¹⁴C 含量可分為二類,一是利用 ¹⁴C 放射的 β 粒子數目估計 ¹⁴C 的含量;

二是直接測量¹⁴C原子的數目(加速器質譜法,Accelerator mass spectrometry method, AMS method)。本研究委託的 Beta 實驗室即是使用 AMS 法,直接测量¹⁴C原子的數目以及¹³C所含的比例,並經年代校正後所得樣品年代。 然而為了得到精確的測量數據結果,AMS 法則根據標本製備時生成的 CO₂同時測量¹²C、¹³C 的比例,做為之後定年的計算以及年代校正之使用,其中¹³C/¹²C 的比例值約為¹⁴C /¹²C 的 2 倍,而此比例值的大小是自然界生化反應的自然結果。

4-3 UAV 影像測繪

傳統測繪以飛機並搭載專業航拍相機進行拍攝,除了成本高昂,任務執 行前之規畫與申請相對繁雜。除了快速且大面積範圍測繪的優勢之外,對於 中視尺度地質構造的展現和峭壁露頭面的構造表現並非強項。此外,由於影 像成品的精度較低,因此將傳統航測影像用於地質領域,判識中視尺度地質 構造的實例較少。

反觀以UAV為基礎的攝影測量(UAV-based photogrammetry),機動性高 且相較於傳統航測較為經濟,以低成本高機動性為主打,現已成為各顧問公 司極力發展之調查工具。凡舉航空攝影測量學之應用包含各種地圖測繪,除 了各式比例尺之地形圖和地籍圖,搭配高精度之地面控制點,亦可用於高精 度之大比例尺工程圖測繪,對於工址調查、道路開發定線、都市計畫規劃、

河道防洪設施整治規劃、軍事用途和古蹟調查,提供所需精度之底圖做為參 考之用。而於農業部分則可靠著掛載特定波段感應器,調查農作物之健康狀 況。勘災的部分,則可利用無人飛機探查土石流、山崩等災害區域,圖劃該 次災害影響範圍,以利日後規劃避難區之用。於地質領域,Smith et al.(2009) 利用風箏掛載消費型單眼相機,產生高程精度為 0.25 公尺之數值高程模型 (digital elevation model, DEM)進行地形地貌分析。Stumpf et al.(2013) 以航 空照片加上影像自動判釋技術,分析山崩造成之地表裂隙並結合 LiDAR 資 料進行山崩之動態分析。除此之外 Bemis et al.(2014)以斜向和平面照片,搭 配傳統槽溝開挖之研究方法,改良原手動拼接槽溝各階梯面照片之方式,以 攝影測量之方法,將槽溝各階梯面之構造細節以數位方式展現,為的是以更 高精度之量化方法分析槽溝內之地質構造,並以更生動方式展現槽溝真實 情況。本研究利用高解析度相機,低空拍攝地面以及峭壁露頭面的高解析度 影像,用於判釋地質構造並將野外露頭實際狀況以三維模型之方式展現於 電腦,且提供量化之地質構造資訊用於地質構造分析。

4-3-1 無人飛行載具規格

近年無人飛行載具(unmanned aerial vehicle, UAV)技術成熟,且售價降低,入門門檻下降,除了攝錄影等娛樂用途,航空測繪亦可勝任。本研究選用 DJI Phantom 3 Professional 與 DJI S1000⁺搭載 Panasonic Lumix GH4 12mm Lens 高解析度數位相機(圖 39)作為測繪工具。二者最大差異為機身大小、抗風性與影像解析度。Phantom 3 為輕型四軸飛行器,機動性高且方便攜帶, 體積較小,因此在抗風性較差。S1000⁺為專業級八軸飛行器,因槳數較多且載重較大,雖飛行時間較短,但抗風表現較佳,更能勝任海邊等風勢較不穩定之區域調查工作。

表 4 本研究使用之無人飛行載具以及相機規格表。

飛行器名稱	DJI S1000 ⁺ 搭 載	DJI Phantom 3 Professional					
	Lumix GH4 12mm Lens						
軸距	1045 mm	590 mm					
總重量(含電池)	9.7 kg	1.28 kg					
最佳飛行時間	15 min	23 min					
最大飛行速度	16 m/s	16 m/s					
最大上升速度	6 m/s	5 m/s					
視野大小(FOV)	85°	94°					
感光元件大小	17.3*13.0 mm ²	1/2.3 英吋					
影像尺寸(pixel)	4608*2592 (16:9)	4000*3000 (4:3)					
GPS 模式	GPS 單系統	GPS/GLONASS 雙系統					
電池容量(種類)	23000 毫安 (LiPo 6s)	4800 毫安 (LiPo 4s)					



圖 39 本研究所使用之無人飛行載具器材。白色機體為4軸DJI Phantom 3 Professional;黑色機體為8軸DJI S1000⁺ 搭載 Lumix GH4 12mm Lens。

4-3-2 攝影測量

攝影測量(photogrammetry)為使用攝影技術,再經過計算取得目標物或 是區域範圍等在空間中的長寬高、相對關係或者空間坐標。以下將針對攝影 測量的名詞解釋與基本原理做介紹。

(1)名詞解釋

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

表示每個像素(pixel)在現實空間中代表的實際大小,單位為 cm/pixel, GSD 關係式為:

現在我們將 GSD 關係式拆成兩個分數形式:

$$\frac{\text{距地航高(H)}}{\text{焦距 Fr(mm)}} * \frac{影像感應器寬度 Sw(mm)}{影像寬度(pixel)} * 100 = GSD\left(\frac{cm}{pixel}\right)$$
(2)

其中距地航高(H)/焦距 Fr(mm)就是傳統航空攝影測量定義焦距的倒數,再 由圖 40 可知, 航高 H/焦距 Fr 之比例關係即為實際地面寬度與成像寬度之 比例。若將影像感應器寬度*(H/Fr),即為實際影像所包含之範圍:

<u>距地航高(H)</u> <u>*</u>影像感應器寬度 Sw(mm) = 影像實際範圍 Dw 焦距 Fr(mm) (3)

目前已知影像實際範圍,回顧地面影像取樣距離之定義為單位像素(pixel)下 代表的實際長度(Dw),因此我們再將(3)左式改寫:



圖 40 像平面和物空間平面示意圖。H 為飛行器航高, Fr 搭載相機鏡頭的 焦距; Sw 為 Dw 等比例縮小之長度,其比例關係和 H/Fr 的比值相關,詳細 推導過程請參見內文。

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

設於地表且已知其空間坐標 X、Y、Z之值。地面控制點必須能夠於照片中 清楚辨識,且測量之精度越高、誤差越小,測繪結果精度亦提高。除了測量 的誤差與精度要求外,控制點的布置也必須列入考慮,均勻分布的控制點可 以確實的約制測繪結果之模型變形量(Ruzgiene et al., 2015)。

3. 檢核點(check point):

測量方式與地面控制點相同,但主要為檢察地面控制點的精度,通常僅檢核 X與Y分量,高程Z分量則不列入檢核。本研究以內政部一等水準點B031 作為檢核點,檢合內政部公告的坐標值,與本研究所測量值之差異量。

(2)空中三角測量原理

借由地面控制點(ground control point, GCP),將像平面中的所有點(像素)經過計算,轉換成為地面坐標系統之點位。其中因假設光線於空間中為直進的狀態因此有以下概念:空間比例、空間坐標轉換和空間平移。

由無人機取得之影相為二維空間平面(以下簡稱像平面),而在光是直進的基

本假設下,像平面中幾個重要的點位,我們稱為內方位參數為

1.投影中心: L(x_o, y_o)

2.影像的中心點:像主點 o(x_o, y_o)

3.投影中心與大地平面的垂足點:像底點 n(x_n, y_n)

4.物空間坐標投影至像平面點 a(Xa, Ya)。

我們可以將上述的觀念以矩陣方式表示:

$$\begin{bmatrix} X_{A} - X_{L} \\ Y_{A} - Y_{L} \\ Z_{A} - Z_{L} \end{bmatrix} = k[M] \begin{bmatrix} X_{a} - x_{o} \\ Y_{a} - y_{o} \\ -f \end{bmatrix}$$

k 為比例常數,可以由相似三角形關係得:

$$\frac{X}{X_{\rm A} - X_{\rm L}} = \frac{Y}{Y_{\rm A} - Y_{\rm L}} = \frac{Z}{Z_{\rm A} - Z_{\rm L}} = \frac{1}{k}$$

其中(X,Y,Z)為修正過後之像空間輔助坐標

$$[M] \begin{bmatrix} X_{a} - x_{o} \\ Y_{a} - y_{o} \\ -f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

[M]為3*3旋轉矩陣表示由像平面旋轉至大地坐標系統平面之旋轉量,而旋轉矩陣中的元素由像機之外方位參數ω、φ、κ組成,ω為沿著X軸方向之旋轉角,φ為沿著Y軸方向之旋轉角,κ為沿Z軸方向之旋轉角(左旋為正):

而其中[M]=[Mω]*[Mω]*[Mκ]為三個旋轉分量的總結果,我們再將[M]展開:

[1	0	0	1	<mark>Γcos</mark> φ	0 0	—sin φ	1	cos κ	—sin к	0		$[m_{11}m_{12}m_{13}]$
0	cos ω	–sinω		0	1	0		sin ĸ	cos k	0	=	$m_{21}m_{22}m_{23}$
Lo	sin ω	cosω	J	sin φ	0	cos φ		0	0	1.		$[m_{31}m_{32}m_{33}]$

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

-cosφsinκ	sin ω]
$\cos\omega\cos\kappa + \sin\omega\sin\phi\sin\kappa$	$-\sin\omega\cos\varphi$
$\sin\omega\cos\kappa - \cos\omega\sin\varphi\sin\kappa$	$\cos \omega \cos \varphi$

接著代回共線方程式

$$\begin{bmatrix} X_{a} - x_{o} \\ Y_{a} - y_{o} \\ -f \end{bmatrix} = k^{-1} \begin{bmatrix} M \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_{A} - X_{L} \\ Y_{A} - Y_{L} \\ Z_{A} - Z_{L} \end{bmatrix}$$

展開得:

$$X_{a} - x_{o} = k[m_{11}(X_{A} - X_{L}) + m_{12}(Y_{A} - Y_{L}) + m_{13}(Z_{A} - Z_{L})]$$
(5)

$$Y_{a} - y_{o} = k[m_{21}(X_{A} - X_{L}) + m_{22}(Y_{A} - Y_{L}) + m_{23}(Z_{A} - Z_{L})]$$
(6)

$$-f = k[m_{31}(X_{A} - X_{L}) + m_{32}(Y_{A} - Y_{L}) + m_{33}(Z_{A} - Z_{L})]$$
(7)

而由於 k 是未知數我們將(5)/(7)以及(6)/(7)得:

$$X_{a} - X_{o} = -f \frac{[m_{11}(X_{A} - X_{L}) + m_{12}(Y_{A} - Y_{L}) + m_{13}(Z_{A} - Z_{L})]}{[m_{31}(X_{A} - X_{L}) + m_{32}(Y_{A} - Y_{L}) + m_{33}(Z_{A} - Z_{L})]}$$
(8)

$$Y_{a} - y_{o} = -f \frac{[m_{21}(X_{A} - X_{L}) + m_{22}(Y_{A} - Y_{L}) + m_{23}(Z_{A} - Z_{L})]}{[m_{31}(X_{A} - X_{L}) + m_{32}(Y_{A} - Y_{L}) + m_{33}(Z_{A} - Z_{L})]}$$
(9)

(8)(9)即為共線條件式。



圖 41 空中三角測量,共線條件原理示意圖。灰色平面為像平面,而 Z_A為物空間中的其中一點,與像平面上的 a 點相對應。在光是直進的假設下可將 a和 Z_A相連通過L成為藍色的直線,即為共線條件中的基本假設。詳細理 論推導請見內文。

(3) 差異量

1. 影像匹配誤差

本研究採用套裝軟體 Pix4Dmapper pro 進行影像匹配以及空中三角測量等, 製做研究區域底圖與地表三維模型。然而以重疊的照片進行影像匹配並非 完美,依然存在著匹配後的誤差,而該匹配誤差的概念可以從圖 42 中了解, 以誤差橢圓表示。橢圓內的範圍即為同一匹配點的誤差範圍,在該橢圓範圍 內皆為軟體計算出 2 張照片,相同匹配點的位置。而各控制點匹配誤差值 則於軟體精度報告表有詳細的說明。



圖 42 Pix4Dmapper pro 影像匹配誤差示意圖。二張影像於紅色圈範圍內之 共同匹配點誤差,標示於圖的上方綠色圓圈內,而軟體所計算的匹配誤差量, 即是綠色橢圓的長軸大小。

2. DSM 精度檢核

我們將包含控制點位置的圖層套疊至 DSM,於 GIS 軟體內求得 DSM 上控制點的空間坐標,而後再與 GPS 靜態測量所得控制點測量值相減得差異量, 分析本研究所製作的 DSM 的品質。

4-3-3 全球衛星系統靜態測量(Static GPS survey)

(1) 簡介:

本研究採用全球衛星定位系統靜態測量(Static GPS survey)測量地面控制點, 以下簡稱 GPS 靜態測量。GPS 靜態測量原理為收集各地面控制點位置的接 收器,於同時間區間的衛星資料(簡稱共同觀測的衛星資料),再進行資料解 算(post-processing)得衛星與各接收器的空間距離以及各接收器之間的空間 向量。而觀測時間(observation time)取決於基線(baseline)的長度。USGS(美 國地質調查所)則建議共同觀測時間至少為 30 分鐘,基線較長的情況則可達 4 小時,詳見(表 5)。而為了提高作業效率,因此需事先規劃施測跑站順序 方能有效率的執行測量任務。除此之外,GPS 靜態測量不需考慮通視量好 與否即可進行測量,施測方法較為簡易,相較於傳統以全測站(Total station)

施測的導線測量法或三角測量法,相對節省人力。此外僅考慮通透度問題, 為的是確保衛星訊號接收品質。而回到室內,經由人工分析衛星資料進行解 算和平差,更能提高解算成果的品質,精度可達公厘等級。

而由於 GPS 靜態測量為蒐集衛星訊號而後進行解算與平差求取空間坐標,本研究設定接收器每1秒蒐集一筆衛星訊號。若假設觀測時間為 30 分鐘,該次測量即可求得 1800 筆由衛星訊號解算得的測站坐標資訊,而後利 用此 1800 筆坐標資訊,計算標準差求得各測點的精度。單一測點標準差σ 的統計方式如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (l_i - \bar{l})^2}{n}}$$

n 為坐標值的筆數; l_i為一次的坐標解算值, l̄為觀測時間內, 所有坐標解算值的平均值。

表 5 GPS 靜態測量觀測時間和基線長度比較表。(摘自 Leica GPS500 使用 手冊)

基線長度(Baseline-length)	觀測時間(Observation time)
1-3 km	15 min
4 km	20 min
5 km	25 min
6 km	30 min
7 km	35 min
8 km	40 min
9 km	45 min
10 km	50 min
>10 km	>60 min

(2)施测方法與過程:

然而為了取得各控制點的空間坐標,我們假設基站之參考坐標為無誤差的 情況下,將基站設於設於已知點(通常為一等水準點),方能利用已知坐標解 算其於測站的坐標。本研究以內政部公告一等水準點做為已知點進行測量, 點位編號為 B030,另一個一等水準點 B031 做為檢核點,並設置 A、C、D 和 E 共 4 個控制點於研究區域內,為的是約制模型,並賦予模型空間資訊。 野外施測,共使用 3 台接收器進行共同觀測,並設定每 1 秒蒐集 GPS 衛星 訊號,目的是加速施測速度以及提高測量結果品質,而施測內容詳細如下: 首先我們將接收器布置於 B030、B031、A,並設共同觀測時間 40 分鐘(圖 43a)。經過 40 分鐘共同觀測時間後,將 B030 移至 C 點,設定 A、B031 和 C 共同觀測時間 20 分鐘(圖 43b)。而後依序針對三角形 ACE、三角形 CDE, 各別觀測 20 分鐘(圖 43c、d)。一等水準點的位置與各控制點的位置與網形 示如圖 43。


圖 43 本研究 GPS 靜態測量施測過程示意圖。(a)為例用 B030 一等水準點 做為參考點進行測量;(b)20 分鐘後移動各接收器至 A、C 控制點;(c)(d)步 驟與前述相同,詳細施測細節請參考內文。



圖 44 控制點和一等水準點空間分布示意圖。

4-3-4 UAV 影像測繪作業程序內容

UAV 攝影測量因用途不同,而有不同的比例尺以及精度要求。考量成本以 及施測時安全性,事前擬訂測繪計畫實屬必要。本研究坐標系統採用 TWD97 (Taiwan Datum 1997)二度分帶大地坐標系統,做為測繪結果的坐標 格式。以下為本研究的 UAV 影像測繪作業程序(圖 45)。



圖 45 UAV 影像測繪作業流程圖。

(1) 測繪計畫制定:

根據測繪區域之地形、用途以及目的,確定測區範圍,選定無遮蔽之起飛地 點,飛行高度、航線規劃考慮重疊率、控制點分布並選定適合飛行之工作日 以及工作日數。本研究測繪區域約為1平方公里,先於 Google Earth 調查 露頭峭壁面高約80公尺。我們以 Phantom 3 Professional 和 DJI S1000⁺ 執 行飛行任務,但由於二飛行器影像解析度不同,因此分別 Phantom 3 Professional 以 100公尺航高拍攝平面影像,DJI S1000⁺ 以 150公尺航高拍 攝平面影像,使得影像空間解析度略為一致。除此之外,加上斜向拍攝的方 法,以 UAV 貼近峭壁面拍攝影像,取得峭壁面高解析度的影像以利分析。 (2)地面控制點佈測:

包括控制點佈設以及定位測量二項。首先根據施測區域大小和地形,規劃地面控制點的位置,並於各控制點佈置航空標。航空標的設計依據內政部「基

本圖測製說明」,航空標應設於通透度良好的位置,並於拍攝航照前設置。 其中,航空標的大小以照片中能夠辨識的大小為原則,中心標於影像不可小 於2個像素。本研究設計的航空標之標誌以GSD的三倍為大小,例如預定 成果GSD為3公分,標誌大小需至少為9公分×9公分之矩形(圖46)。此 外因白色反照率高,建議標誌填色以白色為主。

(3)地面控制點測量:

將步驟 2 之航空標固定或是噴漆標示於地面後,開始地面控制點測量。本研究使用 GPS 靜態測量法,快速取得研究區域內地面控制點空間坐標,詳 細施測規劃詳見 3-3-3 全球衛星系統靜態測量章節。

(4)飛行計劃執行:

飛行器之軟體、機械電路與相機設定確定無問題後,於預定之空曠無信號遮 蔽之場地執行飛行計劃。飛行中操作人員須緊盯地面控制站回傳之訊息,若 發現飛行器有異常動作,立即通知飛控手以手動模式介入。

(5)影像資料處理:

將影像資料匯入電腦中,再依照 Pix4D mapper pro 軟體內的步驟,點選控制點位置並手動校正匹配不合理處。



圖 46 航空標示意圖。 (a)現場航空標布置情形; (b)航空標規格。

五、 研究結果

5-1 大甲溪畔 UAV 影像測繪

5-1-1 控制點測量結果與檢核

本研究以內政部一等水準點 B030 做為基站,將空間坐標引至一等水準點 B031、A、C、D和E控制點進行解算,詳細施測規劃詳見全球衛星系統靜態測量章節,而地面控制點測量結果如表 6。

檢核內政部一等水準點 B₀₃₁ 解算所得值與公告值,各方向分量之差異 量為東西向 0.007 公尺、南北向 0.016 公尺與高程差異量 0.008 公尺(表 7)。 我們根據內政部一等、二等和三等水準點所公告的精度標準,評估本次 GPS 靜態測量的測量品質。而各等級的水準點閉合差計算方式以即應達到的閉 合差如

表 8。本研究假設 B₀₃₁ 起始測量值即為內政部公告值,檢核應達閉合差和 高程的差異量(表 7),顯示本次 GPS 靜態測量品質不足二等水準點,但高 於三等水準點規範。

赤牛口里	GPS 靜態測量值			精度		
招呐和	東[m]	北[m]	高程(m)	東[m]	北[m]	高程(m)
B 031	221782.369	2685595.213	212.23	0.002	0.003	0.006
Α	222951.179	2686927.553	252.596	0.002	0.003	0.007
С	223059.532	2686242.788	214.615	0.003	0.003	0.006
D	223326.986	2686234.973	221.814	0.003	0.003	0.007
Ε	223433.352	2686805.207	284.53	0.005	0.004	0.013

表 6 以 GPS 靜態測量之地面控制點測量值和精度表。

表 7 已知點一等水準點 B031 檢核表。

一等水準點	東[m]	北[m]	高程(m)
B031(公告值)	221782.376	2685595.197	212.2378
B031(測量值)	221782.369	2685595.213	212.23
差異量	0.007	0.016	0.008

表 8 各等級水準點應達閉合差表。K 為基線長度(公里),以 B030 與 B031 於三維空間的直線長度做為基線計算。

水準點等級	計算公式	應達閉合差(m)
一等水準點	$\pm 2.5 \text{mm}\sqrt{K}$	0.003
二等水準點	$\pm 5 \text{mm}\sqrt{K}$	0.007
三等水準點	$\pm 8 \text{mm} \sqrt{K}$	0.011

5-1-2 模型誤差

本研究共結合 1003 張影像進行影像匹配,而每張影像平均含有 13945.4 個匹配點,共產生 104,690,336 個點雲,正射影像的平均 GSD 為 4.38 cm/pixel。 而研究區域彩色點雲模型和 A、C、D 和 E 地面控制點位置如圖 47 所示。

控制點檢核結果如下表 9。我們以方均根誤差(Root-mean-square error, RMSE)評估此筆 DSM 和 GPS 靜態測量各方向誤差值的離散程度。RMSE 的計算方式為:

RMSE =
$$\sqrt{\frac{\Sigma e_i^2}{N-1}}$$

ei為各控制點 DSM 計算值和 GPS 靜態測量的差異量,N 為控制點總數。檢核結果為東西向 RMSE(x)=0.129,南北向 RMSE(y)=0.031,高程 RMSE(z)=0.095,顯示 DSM 結果和 GPS 靜態測量在東西向誤差的離散程度

較大(表 9)。而檢視表 9 的差異量,僅控制點 E 東西向差異量為 0.221 公 尺,其餘控制點的水平差異量在 0.05 公尺以內,表示地面控制點經人工辨 識產生的誤差,大多控制在框標的白色方形框範圍內(10*10cm²),屬合理範 圍內。

然而,由於測區多數區域為受河流侵蝕,地貌變化快速之區域,因此本 研究並未設置額外檢核點於控制點網形內,但以農林航空測量所 GSD=25cm/pixel之正射影像做為參考值,於GIS軟體內丈量各參考地物的 尺寸,再與本研究UAV影像測繪所得正射影像所見得相同地物,測量二者 的差異量做比較。本研究測量鐵道雙向、單軌的寬度、橋墩南北向距離以及 影像中能夠清楚辨識的房舍尺寸。鐵道單軌部分,由於以農林航測所正射影 像無法辨視確切的單軌寬度,因此我們比較台灣鐵路局所公告的開普軌寬 距(Cape gouge)和本研究製做的正射影像的鐵道寬距。開普軌寬距官方公告 為 1.067 公尺,而本研究所測得的軌道寬距界於 1.105 至 1.157 公尺之間, 與軌道標準寬差異量為 0.038 至 0.090 公尺,平均差異量約 0.065 公尺;而 測量其他地物尺寸的結果如表 10 所示,平均差異量為 0.417 公尺,最小差 異量為 0.254 公尺,最大差異量為 0.748 公尺。

此外,本研究以內政部國土測會中心 e-GNSS 系統測得控制點網形外檢 核點 Pt1(位置請參考附錄 C),檢核結果東西向差異量為 0.32 公尺;南北向 差異量為 0.25 公尺。

62

表 9 DSM 精度檢核表。

控制點	G	PS 靜態測量伯	直		DSM 計算值			差異量	
	東[m]	北[m]	高程(m)	東[m]	北[m]	高程(m)	東[m]	北[m]	高程(m)
А	222951.179	2686927.553	252.596	222951.201	2686927.586	252.451	0.022	0.033	0.145
С	223059.532	2686242.788	214.615	223059.537	2686242.812	214.549	0.005	0.024	0.066
D	223326.986	2686234.973	221.814	223326.965	2686234.984	221.778	0.021	0.011	0.036
Е	223433.352	2686805.207	284.530	223433.573	2686805.241	284.506	0.221	0.034	0.024
			RMSE				0.129	0.031	0.095

表 10 地物尺寸測量結果比較表。

测量地物	農航所正射影像测量值(m)	本研究正射影像測量值(m)	差異量(m)
雙向鐵軌寬度	5.564	5.179	0.385
橋墩寬距	32.285	32.031	0.254
民房 01	20.048	20.331	0.283
民房 02	29.782	30.530	0.748
	AVG		0.417
	RMSE		0.533



圖 47 大甲溪三義斷層帶 3D 點雲模型與立面影像位置示意圖。

5-2 后里區域野外調查

由於近日大甲溪床整治工程進行中,出露許多新鮮露頭,而本研究整合 后里台地東側山麓地帶與大甲溪溪床野外調查結果,於本節綜合描述岩性、 岩層位態以及可能的岩性交界位置,其餘詳細的露頭構造判識將於其他節 分段描述。

牛稠坑溪上游,圖 48(1)的位置,於產業道路上,出露灰白色的砂岩。 露頭表層受風化影響且附近植生茂密,須使勁以地質槌敲擊方能得新鮮面, 如圖 49 所示。對照張憲卿(1994)大甲地質圖,以及對於本區岩性的描述, 符合「灰白色或黃白色」砂岩之描述,因此本研究判定此處露頭之岩石可能 為上福基砂岩。而該區域可測得岩層位態約為 N33°W/38°E,標示於圖 48。 牛稠坑溪中游,圖 48(2)位置於道路邊出露紅土層,層間並無礫石,判定應 為晚更新世紅土層(圖 50 上圖)。紅土層有明顯的層理,位態為 N15°E/30° W。

石岡壩下游,圖 48(3)處大甲溪溪邊,出露青灰色砂岩,層間並無發現 炭屑分布或是生痕化石,但層理明顯,岩層位態為 N50°E/41°E。而其東則 出露延續性良好整區域的頁岩,比照地質圖個岩層的位置,本研究判定圖 48(3)之處為桂竹林層魚藤坪砂岩段,以東為錦水頁岩區段。持續向下游延 伸調查,顯見岸邊露頭的岩性,從質地較為堅硬的青灰色砂岩,漸變成為夾 數十公分厚的頁岩,而至圖 48(4)位置,厚超過3 公尺的頁岩與砂岩層接觸, 本區段則判定為桂竹林層十六分頁岩段,岩層位態約為 N74°E/40°S。而從 編號(4)之位置至台鐵橋下方,出露的岩石以青灰色砂岩,夾少量炭屑以及 生痕化石,判定為桂竹林層關刀山砂岩段,且該區域位態轉為 N77°E/30°S, 岩層傾角降低,且能於層間發現黑色的斷層泥,顯示層間滑動顯著。而該區 域大甲溪南岸構造判識結果請參考 5-3-3 大甲溪南岸構造判識章節。

64



圖 48 后里台地東側與大甲溪中游地質調查結果圖。



圖 49 大安背斜東翼上福基砂岩圖。



圖 50 大安背斜南段東翼紅土化階地堆積層與大甲溪溪床魚藤坪砂岩圖。



圖 51 大甲溪溪床十六分頁岩圖。

5-3 大甲溪露頭調查成果

5-3-1 大甲溪北岸峭壁立面圖判識與地質調查成果

本研究以影像測繪所得的大甲溪北岸峭壁露頭立面影像如圖 52,東西 向總長約 980 公尺,地形則由西而東漸升高,自河面算起高度約 110 公尺, 東側為青灰色砂岩組成的桂竹林層,西側為晚於頭嵙山層沉積的階地堆積 層。由西到東,經判識的三條斷層分支為 F1、F2 和 F3。其中 F1 斷層為黃 鑑水與張憲卿(1994)判識的前鋒斷層,現今因部分露頭已被植被覆蓋,F1 斷 層的位置由比照地形、空拍影像與隧道口位置而來。F2 斷層,由露頭局部 近照可以見得礫石層與青灰色桂竹林層明顯邊界 (圖 53),且近 F2 斷層的 礫石受斷層擾動,礫石的長軸方向與 F2 斷層截面平行,上盤為青灰色砂岩 組成之桂竹林層,下盤為礫石層。此外,從局部近照也可觀察得另一個層間 斷層,位於 F2 斷層上盤桂竹林層間,其並未切穿桂竹林層上覆之礫石層(圖 53)。本研究除了以 UAV 搭載高解析度相機,拍攝立面影像進行構造判識, 也親臨北岸峭壁露頭做實地的野外地質調查,並取得部分區域的定年資料。 (1)台鐵橋以西

對照構造立面圖位置 D(圖 52),以及空拍影像(圖 54),本區位於台鐵 橋西側。從空拍影像可見上層為礫石層,下層為砂層(圖 55)。然而近觀峭 壁面礫石層和砂岩層的交界處,可見部分砂岩層中,夾疑似剪動過後產生的 黑色片狀斷層泥,以及和交界面同走向的白色、灰色砂岩層(圖 60、圖 61)。 上層礫石層之礫石大小約 10cm 至 50cm,淘選度差,膠結程度差,礫石常 崩落;下層砂岩層為細粒砂岩,夾少數的黑色碎屑有機物質(圖 58(c))。本 區雖可由礫石層的礫石排列方向判定斷層位置,但實無指準層(key bed)指示 F1 斷層造成的錯距,且綜合前人拍攝影像和現今空拍影像判識,無法確定 F1 斷層是否切穿地表,僅能判定 F1 斷層截切此砂層,斷層面位態為 N55°W/20°NE。 (2)台鐵橋以東

北岸峭壁岸邊遍部礫石(圖 62),而這些堆積的礫石可能為上層礫石層坍塌 至下層堆積所致,或是由大甲溪湍急水勢堆積。由於大雨侵蝕坡面,使得峭 壁面產生侵蝕溝槽。而近於峭壁露頭面近河岸邊,可見青灰色砂岩出露(圖 63),顯示於溪床下可能為青灰色砂岩組成的桂竹林層。以下將針對峭壁面 上各露頭點作詳細的分析,各露頭點位置請參考立面圖(圖 52)。

1. 露頭 A, 位於北岸峭壁西側,鄰近草叢,是目前能夠到達最高點的位置 (圖 52, A 點)。該露頭面坡面角度約 80°,近乎垂直。露頭上半部為破碎的 灰色砂岩,下半部為黃橘色砂岩,呈現破碎貌(圖 64、圖 65)。於灰色砂岩 和黃橘色砂岩交界面可明顯觀察得一約 5cm 寬的剪切條帶,而剪切面周圍 有數條剪切分支,而該主要剪切面位態為 N13°E/34°E。此外,於黃橘色砂 岩中也能發現明顯的黑色剪切面,剪切面位態為 N80°E/90°,而底部的剪切 構造至交界面周圍位態漸轉,於灰色和黃橘色砂岩交界面附近轉為主剪切 面的位態,而於主要剪切條帶末端呈現數條剪切分支。

2. 露頭 B, 位於圖 52, B 點, 坡面遭到侵蝕呈現凹槽狀(圖 67、圖 68), 青灰色砂岩出露, 層間夾黑色斷層泥, 且偶夾 5-10cm 厚的灰白色砂岩, 層 面位態為 N70°E/86°S。

3. 露頭C,位置標示於立面圖C點(圖 52,C點),為目前峭壁面能到達最 東邊的露頭點。本露頭陡峭,上層為礫石層,下層為橘黃色砂岩和灰色砂岩 組成。於黃色砂岩層中可找到斷層,位態為 N65°W/60°S,斷層呈現約 5-7cm 條帶狀像上層礫石層延伸(圖 69)。而於礫石層與橘黃色砂岩和灰色砂岩層 的交界面,可清楚見得礫石破裂的方向,其星芒狀破裂指出主應力可能來自 正下方(圖 70)。

70

(3)¹⁴C 定年結果

此外,至今尚未有研究對鄰近 F1 分支斷層的峭壁面露頭(圖 54)區域的 砂層以及礫石層做年代判定。經調查發現,部分砂岩層含有黑色有機物質 (圖 58(b)、(c)),本研究取部分砂岩層中的黑色有機物,做為訂定地層年代 之標本。標本採集位置標示於圖 57 素描圖中,上層至下層為編號 N160926-C14-1 至 N160926-C14-04 標本,而以 AMS 法測定的 ¹⁴C 年代則以藍色字體 標示。

然而,碳十四定年的結果還需要經過校正,乃因近代大量燃燒石化燃料 和核子試爆,以及太陽磁場強弱影響宇宙輻射線的強弱。我們使用 OxCal ¹⁴C 定年結果校正軟體,以 95%信賴區間(2 個標準差)評估該比 ¹⁴C 定年結 果的可能分布範圍。

校正的曲線以及結果如圖 59 和表 11,此砂層最老可能為約 19589 Cal BP,最年輕可能為 6411 Cal BP,顯示此砂層的沉積年代,極大的機率介於 晚更新世至全新世(11,700 至今)。其餘詳細討論請參閱第 6 章。 表 11 各標本 ¹⁴C 測定年代和校正年代比較表。

標本名稱	¹⁴ C 測定年代(BP)	校正年代(Cal BP)
N160926-C14-1	14440±50	17424-17831
N160926-C14-2	9960±50	11245-11621
N160926-C14-3	16090 <u>±</u> 50	19236-19589
N160926-C14-04	5710±30	6411-6568







圖 53 大甲溪北岸露頭近 F2 斷層近照。F2 斷層上盤為桂竹林層,而桂竹林 層層間又有一斷層。



圖 54 大甲溪北岸空拍影像。紅框區域即為北岸峭壁露頭,台鐵橋以西調查 位置。



圖 55 大甲溪北岸峭壁面影像。(a)為圖 56、57、58 調查以及取樣之範圍。



圖 56 近 F1 斷層峭壁面影像。礫石與砂層交界夾數道條狀砂層,(c)層間疑似夾黑色斷層泥,近照請參考圖 60。





圖 57 標本採樣位置與 F1 分支斷層鄰近區域素描圖。桃紅色字體為標本名稱,藍色字體為定年結果。



圖 58 大甲溪北岸採樣露頭上段照片,位置請參照圖 57(a)平面。紅色箭頭為 F1 斷層位置;桃紅色箭頭為採樣地點。



圖 59 ¹⁴C 定年校正結果圖。灰色區域為校正後年代可能機率分布。



圖 60 受剪切作用之砂層(圖 56(c))。由圖可見為於影像右側的黑色斷層泥 可向左追跡,並與條狀砂岩合併,本圖位置請參考圖 56。



圖 61 受剪切作用的砂層。黑色剪切面標於紅框內。



圖 62 大甲溪北岸峭壁露頭岸邊(向東拍攝)。



圖 63 大甲溪北岸峭壁岸邊出露之青灰色砂岩。



圖 64 大甲溪北岸峭壁露頭點A。



圖 65 大甲溪北岸峭壁露頭點 A,斷層泥近照(紅色箭頭),位置請參考圖 64 紅框。



圖 66 大甲溪北岸峭壁露頭 B,青灰色砂岩近照。位置參見圖 52,B 點位置。



圖 67 大甲溪北岸露頭點 B 青灰色砂岩夾灰白色砂岩。岩層位態 N70℃E/86°S。



圖 68 大甲溪北岸露頭點 B 青灰色砂岩夾灰白色砂岩。



圖 69 大甲溪北岸峭壁露頭點 C。灰白色砂岩與黃褐色砂岩。位態 N65°W/60°S。



圖 70 大甲溪北岸峭壁露頭點 C,礫石層交界面近照。圖中右側礫石星芒狀 破裂指示應力來自該礫石層下方。

5-3-2 大甲溪南岸地質調查

大甲溪南岸正射化影像可見主要出露青灰色砂岩,此外從空拍影像,顯 見青灰色砂岩和黃褐色砂岩接觸。此外,本區部分搭配地球物理探勘-地電 阻影像,剖析南岸部分露頭的地下構造。野外調查以及判識結果詳細內容如 下。

(1)台鐵橋以西

大甲溪南岸露頭位置如圖 72 所示,立面影像為面南拍攝,總長 160 公 尺,底部為大甲溪溪床。由野外調查以及立面影像判釋,立面圖東側為青灰 色砂岩,西側為黃褐色礫石層,且於露頭面發現青灰色砂岩和黃褐色礫石層 的岩性交界面,且交界面附近岩層與沉積物呈現破碎貌,且有常出現黑色且 延伸性良好,疑似受斷層作用後產生的斷層泥,因此判定為斷層接觸關係, 命名為 F4 斷層。

斷層上盤為青灰色砂岩,下盤為黃褐色砂夾礫石層,斷層位態為 N20°E/ 18°E,且斷層上覆年輕的灰色礫石層。於 F4 斷層上盤為粉狀的青灰色砂岩 和下盤的黃褐色砂岩夾礫石,二者皆於斷層附近呈現破碎塊狀貌,且交界面 明顯(圖 73)。圖 71(d)、(e)岸邊露頭位態為 N45°W/31°E。從 F4 斷層像東 追跡至台鐵橋下方,皆可發現破碎的青灰色砂岩出露於岸邊,且由部分開挖 的露頭也可見得黑色斷層泥夾於青灰色砂岩之中(圖 75)。F4 斷層下盤為黃 褐色礫石層組成,若將河岸邊坡表面的礫石移開,可清楚見得黃褐色砂岩夾 帶著不同大小的礫石,且上覆新沉積的灰色礫石層,接觸面平整,如圖 74 所見。此外,對照 SY23 地電阻剖面,可歸納得斷層上盤桂竹林層,電阻率 約在 100Ohm-m 以下(綠色-藍色區間);斷層下盤階地堆積層因含砂岩以及 礫石,電阻率較高,約在 200Ohm 以上(深橘色-紅色)。本研究藉由以上南岸 露頭和 SY23 測線的電性地層分析結果,做為豐原市區地電阻剖面判識的標 準。

85



圖 71 大甲溪南岸路頭空拍照與露頭近照。



圖 72 大甲溪南岸露頭立面圖與地電阻剖面 SY23。位置請參考圖 71(c)。



圖 73 大甲溪南岸露頭近照,位置請參考上頁圖 72。



圖 74 大甲溪南岸露頭東側,灰色礫石層與黃褐色砂岩交界照。



圖 75 近大甲溪南岸 F4 主斷層,夾於青灰色砂岩中的黑色層間斷層泥。



圖 76 近大甲溪南岸 F4 主斷層附近露頭。色箭頭所指位置為可能的剪切構造位置。

(2)台鐵橋以東

近新台鐵山線大甲溪南岸,為大甲溪溪床整治開挖得新鮮露頭面(圖 77),而比對舊時 Google 衛星影像或是航照,本區域原為大甲溪河道。

溪床出露青灰色砂岩偶含 1-5cm 塊狀碳削於層間,且細粒砂岩層間含 貝類化石或生痕化石(圖 78)。而近台鐵橋的岩層位態為 N77°E/34°S,至東 側大甲溪岸邊,地層位態轉為 N40°E/32°S。沿層面方向觀察,可見得黑色 層間斷層泥間隔約 2-5m 出露(圖 79),且可沿層面追跡。溪床露頭面上也 發現剪切構造(圖 81),呈現條帶狀且隆起於地面,走向與層面夾約 45°-60°。 此外本區節理發達,主要的 2 組節理的走向約為 N85°W 與 N5°E,節理截 切上述的黑色層間斷層泥(圖 79)。而由野外觀察得岩性、生痕化石與貝類 化石等證據,判定南岸溪床出露的為桂竹林層關刀山砂岩段,且本區層間滑 動顯著,由數道循跡性良好的斷層泥與剪切構造判識而得。

沿著大甲溪往上游調查,岩性漸變為砂岩夾頁岩,由夾20公分頁岩漸 轉為厚約2-5公尺厚的頁岩,而本研究將第一道出露的厚層頁岩位置,定為 桂竹林層關刀山砂岩段和桂竹林層十六分頁岩段的交界(圖48)。接著在往 上游調查,顯見厚約3公尺的頁岩與砂岩互層,直至南岸盡頭。



圖 77 大甲溪溪床新鮮露頭面(向東拍攝)。



圖 78 夾於灰色砂岩中的炭屑與生痕化石近照。


圖 79 黑色層間剪切面,原子筆尖端指向為地層層面約略的走向(層面位態 N70°E/34°S)。



圖 80 黑色層間剪切面(右側紅色箭頭)和炭屑(左側藍色箭頭)。



圖 81 條帶狀的剪切構造(筆尖指向)。



圖 82 節理截切黑色剪切面。

5-4 豐原市區三義斷層跡位置

由於豐原市區缺乏野外露頭作為控制點,因此以地電阻探勘並搭配鑽 井資訊,判識三義斷層的位置。以下首先整合鑽井資料與地電阻探勘結果會 至剖面判識斷層位置,而無鑽井資料控制之地區,輔以地電阻剖面高阻(上 盤)與低阻(下盤)判識三義斷層可能上下盤位置,最後整合以上資訊繪製三 義斷層的位置。

5-4-1 ERI 判識之斷層上下盤位置

本研究以桂竹林層與晚更新世以後沉積的河階礫石層,最西側的接觸 位置,垂直投影至地表面,做為三義斷層跡的位置(圖 86)。本研究以大甲 溪南岸 SY23 測線所得結果作為控制,判識上盤或是下盤位置。100Ohmm(綠-藍)低阻區視為三義斷層上盤桂竹林層;200Ohm-m以上高阻區視為三 義斷層下盤。而做為斷層跡位置控制點的地電阻剖面自北而南:

(1)SY25 測線為東西走向,深度 11 公尺以上紅色高阻區經判識為表層礫石層。而 11 公尺以下為藍、綠色低阻區,再比對大甲溪溪床南岸剖面,推斷為桂竹林層,三義斷層之上盤。

(2)SY09為南北向測線,於測線南端測得疑似低阻和高阻交界面,但由於該 區域無鑽井資料做為控制,且高低阻交界區角度約 50°,並非典型逆衝斷層 的斷層面傾角,因此以虛線表示為可能的斷層位置。

(3)SY10 測線為南北走向,南端低阻區域(藍綠色)距地表僅約12公尺,可能為人工回填層或是桂竹林層,北端顯示為紅色高阻區域,推斷為礫石層。再者,高低阻交界面位於測線南端,角度約為60°,雖為三義斷層的可能性低,但由於北端高阻資料顯示可能為斷層上盤礫石層,因此將本測線所得之不連續面做為三義斷層進地表的位置控制點之一,並以虛線表示為斷層可能的位置,紅色高阻區為斷層上盤。

(4)SY01, 東西向測線, 高阻分布於 13 公尺以上, 推斷為礫石層, 而 13-26

公尺為低阻區(藍色),投影至 F1-F1'剖面,研判為桂竹林層。且比對鑽井資 料,此測線並未測得三義斷層可能之不連續面。

(5)SY16,東西向測線,高阻區域分布於 5-13 公尺深,而其餘 13 公尺以下 顯示為低阻區,雖無鑽井資料控制,但可推斷低阻區為桂竹林層,因此本測 線位於三義斷層上盤之機率較大。

(6)SY13,東西向測線,僅東側表層深度5公尺以上顯示為低阻區,研判為 人工回填層,其餘部分為高阻區,再將本測線結果投影至F2-F2'剖面,可推 斷本測線位於三義斷層上盤。

(7)SY08,東西向測線,電性反應與SY13類似,表層10公尺以內顯示為低 阻區域,研判為人工回填層,而10-37公尺深則為高阻區,研判為礫石層。 由於測線所得資料多為高阻之礫石層反映,且無明顯角度之不連續面可代 表三義斷層通過,因此推斷本區位於三義斷層上盤。

以上地電阻調查結果和鑽井資料,判識之三義斷層跡繪於圖 86。自大 甲溪南岸剖面,桂竹林層上衝至階地堆積層之位置開始,桂竹林層前緣和階 地堆積層接觸的位置投影至地表,做為斷層跡。然而由本研究所取得之鑽井 與地電阻探勘之資料僅能判定至豐原市區南側,其餘三義斷層向南延伸的 部分則以 Wang et al.(2002)的震測剖面搭配地質剖面,於 5-5 討論。



圖 83 地電阻剖面影像,位置詳見圖 86。

5-4-2 整合 ERI 與鑽井資料判識

此外,本研究整合鑽井位置以及 ERI 剖面位置,繪得 F1-F1'剖面(圖 84)、 F2-F2'剖面(圖 85),斷層位態乃根據大甲溪南岸露頭 F4 主斷層位態。二剖 面位於豐原市區,由 DEM 所得的地形資料顯示,本區域地形變化不顯著, 且無明顯異常傾動的地形面。而自鑽井資料可得知,豐原市區除了部分鑽井 資料顯示表層為回填土層,其他井錄資料皆表地下約 8-10 公尺為黃褐色砂 岩和礫石所組成的沖積層,且黃褐色砂岩層覆蓋於青灰色砂岩之桂竹林層 之上,為不整合接觸關係。比對鄰近的 ERI 與鑽井結果,桂竹林層呈現低 阻(1000hm-m以下,藍色-綠色);砂層與礫石層為高阻(2000hm-m以上,深 橘色-紅色)與大甲溪南岸露頭 SY23 測線各地層反應的電性相同。以下針對 各剖面,做整合性的描述與判識。

(1)F1-F1'剖面

F1-F1'剖面位置如圖 86 所示,位於豐原市區北側。而由於鑽井資料並 非位於同一剖面之上,因此採用投影的方式,將 Sanyi-2A、2B、2C、2D(自 西到東)以及 SY11、01、02(自西到東)投影至本剖面。對照 SY11、01、02、 21、15 地電阻剖面,礫石層顯示為高阻區(紅色),而低阻(綠色-藍色)則於近 地表可能為回填土層,較下層(約 20-30m)位置判識為桂竹林層,並搭配鑽 井資料,繪製桂竹林層和礫石層的層面交界,且根據大甲溪南岸主斷層 F4 傾角為 18°S,再者,由於最前緣 Sanyi-3B 井錄並未發現明顯的剪切構造, 顯示最前緣的分支斷層經過該井的機率極低,因此將三義斷層主斷層可能 的位置置於 Sanyi-3B 井之下,約 50-100 公尺深,且被河階礫石層掩覆,而 主斷層最前緣位於井 Sanyi-3B 與 Sanyi-3C 之間。

(2)F2-F2'剖面

F2-F2'剖面位於豐原市區南側(圖 86),地形面屬於舊時大甲溪的沖積區。本剖面包含井 Sanyi-4C、4D、4B、4A(自西到東)以及 SY04、03、13(自

西到東)。比較鑽井資料和 SY04、03,地電阻剖面影像於近地表的低阻區域 可能為人工回填土層,高阻區域應為砂層與礫石層。由於無 Sanyi-4B、4A 之間的地電阻調查資料,桂竹林層和河階堆積礫石層的交界面乃參考井錄 所得的岩層交界面而得。此外,由於 Sanyi-4C 發現明顯的剪切構造,再者 以斷層傾角以 Wang et al.(2002)震測剖面斷層傾角約 30°建構本剖面,該井 之剪切構造有極大的機率為三義斷層主斷層於最前緣的分支斷層。

然而由於地電阻剖面,於井 Sanyi-4D、4B 之間測深不足,無法確切判 定三義斷層主斷層的前緣位置,僅能確定主斷層的前緣可能位於 Sanyi-4D 的東方,上覆河階礫石層,且深度大於 50 公尺。



圖 84 剖面 F1-F1',位置請參考圖 86。根據鑽井資料以及地電阻調查結果, 三義斷層並未切穿地表,斷層跡被晚更新世之後,沉積的礫石層覆蓋,而礫 石層和斷層上盤的桂竹林層不整合接觸,上盤礫石層平均厚度約為8公尺。



圖 85 剖面 F2-F2',位置請參考圖 86。分支斷層(Splay fault)乃根據 Sanyi-4C 井錄資料顯示的剪切構造,將三義斷層前緣(桂竹林層最前緣)向前延伸。 由剖面圖得知,無論地質鑽井或是地電阻調查,測深尚未到達三義斷層主斷 層面的深度。斷層上盤礫石層厚度約為 15 公尺。



圖 86 豐原市區地質鑽井與地電阻影像剖面位置圖。剖面 F1-F1'與 F2-F2' 位置以藍色粗線表示。紫色虛線為本研究判識的三義斷層跡位置(本影像經 由經濟部中央地質調查所提供之空載光達數值地形資料產製)。

5-5 三義斷層各段之地質剖面

5-5-1 大安背斜剖面

本區域整合台灣中油公司地質圖、經濟部中央地質調查所地質圖、本研 究的地表地質調結果以及陳文山等人(2013)報告書結果並搭配大安背斜之 震測解釋(邱華燈,1962),繪製地質構造剖面。

HL-HL'剖面

HL-HL'剖面位置如圖 92 所示,橫跨后里地區至東側山麓地帶。屯子腳 斷層(Tuntzuchiao fault)位於剖面西側,為西元 1935 年新竹台中地震之地震 斷層,右移之高角度斷層,斷層面約為 85°,有著造成地表破裂之紀錄。三 義斷層位於井 102BH-03 和 102BH-01 之間,並未切穿地表之晚更新世之後 的礫石層,上盤為中新世桂竹林層,且地形面有些微傾動(陳文山等人,2013)。 然而根據鑽井資料、地表地質、岩性分布和岩層位態,並整合大安背斜震測 剖面之解釋(邱華燈,1962),本研究認為三義斷層於前緣接近地表面,以約 40°之斷層角度將晚中新世之桂竹林層、中新世東坑層、上福基砂岩推至地 表,而於地下約 200 公尺處斷層面轉為近 20°向下延伸,且根據東坑層之層 厚(約 650 公尺),背斜軸部地下約 500 公尺處可能為中新世中期地觀音山砂 岩(Ky)以及打鹿頁岩(Talu Sh)。

三義斷層活動後影響了鄰近地層的位態。而大安背斜即位於三義斷層 之上盤。由褶皺的幾何形貌分析,背斜右翼(back limb)地層傾角緩於背斜左 翼(forelimb)近斷層區域為不對稱褶皺(asymmetric fold),比較斷層擴展褶皺 (fault-propagation fold)模型(圖 87),斷層上、下盤的地層幾何形貌相似,但 由於該模型為假設斷層發育時,其尖端(fault tip)並未切穿地表為盲斷層 (blind fault),再者根據大甲溪南岸主斷層截切階地堆積層之證據,三義斷層 活動時極可能切穿當時地表,模型假設與本研究的觀察資料並不完全吻合, 因此僅將大安背斜歸類為「類似斷層擴展褶皺」形貌的背斜構造。此外,由

於區域鄰近大安溪以及大甲溪,背斜二翼上部之地層已被侵蝕殆盡,地層可 能的原始形貌延伸以藍色虛線繪於剖面。



圖 87 斷層擴展褶皺演化圖。由圖所示斷層尖端(fault tip)不斷地向地表發育, 而斷層上盤之地層也隨著斷層發育而產生非對稱褶皺。(摘自 Rowland et al., 2007)



圖 88 HL-HL'剖面。剖面位置詳見圖 92, 藍色虛線表示大安背斜二翼上部地層可能的延伸位置; 地層中的黑色實線 表示邱華燈(1962)震測剖面之地層位態解釋線。

5-5-2 大甲溪剖面

本研究根據地表地質調查結果,以及地質圖上所標示之地層位態,繪製 了 DJ-DJ'剖面,並將以 UAV 影像測繪結果之地質構造立面判識結果整合。 (1)DJ1-DJ1'剖面

首先由小區域的大甲溪南北岸露頭 DJ1-DJ1'剖面切入(圖 90)。主斷層 為大甲溪南岸的 F4 斷層,而北岸最西側的分支為 F1 斷層,截切階地堆積 層,其餘的分支斷層(F2、F3)於桂竹林層間滑動尚無法確定錯移量。本研究 所提出的構造剖面與 Ramsay & Huber(1987)所提出的逆衝斷層帶的模型比 較,斷層的幾何形貌吻合,且整大甲溪溪床發現的 SF1-SF5 分支斷層(林啟 文等人,2008;劉彥求與李奕亨,2006;梁勝雄與陳建良,2016),呈現 Ramsay & Huber(1987)所提出的逆衝斷層帶模型。

Ramsay & Huber(1987)所提出的逆衝斷層帶的模型,如圖 89 所示,該 模型包含主斷層面、前緣的分支斷層(termination splays),以及上盤數種形 式的分支斷層(isolated splay, diverging splay, rejoin splay, connecting splay)。 其中,依據各分支斷層面的角度以及各斷層面連接的位置分類:前緣分支斷 層 termination splays 發育於主斷層的最前緣,且可能為數條、各斷層面角 度不同的分支斷層;而 isolated splay 為一獨立的分支斷層面, diverging splay 或 rejoin splay 則為角度不同且無連接其他分支斷層, connecting splay 為連 結二分支斷層之分支斷層面;主斷層位於模型最下層,各分支斷層則與主斷 層上盤面相連。

比對大甲溪溪床分支斷層(SF1-SF5、F1-F3)平面位置,除了分支斷層發 育位置吻合模型的假設,SF1-SF5 斷層的分布和幾何形貌,大致與模型吻合。 此外,雖可於立面圖判識各分支斷層位置,但各分支斷層面的實際走向因位 於峭壁而無法測量,本研究將F2和F3分支斷層分類為 isolated splay。



圖 89 逆衝斷層帶模型。該模型以主斷層(main fault)、前緣的分支斷層 (termination splays),以及上盤數種形式的分支斷層(isolated splay, diverging splay, rejoin splay, connecting splay)所組成。此逆衝斷層帶模型與大甲溪三義 斷層帶的野外觀察結果相吻合。(Ramsay & Huber, 1987)

(2)DJ-DJ'剖面

DJ-DJ'剖面位於大甲溪北岸(圖 92),並整合大甲溪三義斷層帶南岸以及北岸構造立面判識圖、地表地質資訊。

綜合 DJ1-DJ1'剖面,DJ-DJ'剖面如圖 90所示,三義斷層位於剖面西側, 主斷層面約 20°,截切近地表地階地堆積層,且上盤有數條分支斷層(F1-F3)。 而根據本研究於后里抬地東緣山麓地區測得地層位態,以及地調所地質圖 提供地層位態,顯示本剖面東側之地層(桂竹林層、錦水頁岩、卓蘭層)岩層 傾角自西側約 25°-30°向東傾沒,轉為東側約 30°-40°向東傾沒,至剖面最東 之頭嵙山向斜右翼,岩層傾角轉為向西傾沒。根據以上斷層傾角以及岩層傾 沒之走勢,本研究認為三義斷層為造成該區域地層傾斜的主要活動構造,除 了造成大甲溪斷層帶,桂竹林層層間有著顯著的層間滑動,剖面東側的錦水 頁岩、卓蘭層之地層位態也因三義斷層活動受到影響。然而,本區三義斷層 將桂竹林層推至近地表,截切低位階地堆積層,相較后里地區 HL-HL'剖面 斷層將中新世中期之東坑層推至地表形成大安背斜,兩者除了上盤的構造 不同,亦顯示三義斷層於大甲溪之抬升量少於后里地區。



中 F1 截切階地堆積層且位於分支斷層的最西緣。F2、F3 於桂竹林層中錯動,歸類為三義斷層帶上盤的分支斷層。

5-5-3 豐原地區剖面

本區亦藉由地電阻剖面、鑽井資料、岩層地表位態,並整合台中盆地東 側之淺層震測剖面。本區地層由老至年輕為桂竹林層(Kc)、錦水頁岩(Cs)、 卓蘭層(Cl)、頭嵙山層(Tk)、階地堆積層和沖積層。

(1)FY-FY'剖面

本剖面橫跨豐原市區,東至新社(Hsinshe)(圖 92)。根據震測解釋(Wang et al., 2002),以及豐原市區鑽井桂竹林層之位置,推定三義斷層位於剖面的 西側,且斷層傾角約 30°向東傾沒,斷層下盤為頭嵙山層或是更年輕的礫石 層,斷層上盤為桂竹林層;三義斷層東側緊臨車籠埔斷層。西元 1999 年集 集地震,車籠埔斷層錯動所造成的地表破裂跡位置標於剖面,顯示車籠埔斷 層沿著錦水頁岩底部錯動,斷層傾角約 30°,為三義斷層上盤之活動構造。 此外位於東側的卓蘭層,岩層位態也受到三義斷層以及車籠埔斷層活動所 影響,西側地層約為 30°向東傾沒,而至東地層傾角漸轉水平,新社(Hsinshe) 河階地東側地層則向轉為西傾沒,頭嵙山向斜(Toukoshan syncline)即標示於 該區。

(2)FY2-FY2'剖面

本剖面位於 FY-FY'的南側,構造和地層的分布與 FY-FY'相似,車籠埔 斷層位於三義斷層上盤,亦為近期影響東側卓蘭層以及頭嵙山層位態的活 動構造之一。如剖面圖所示,三義斷層於此區傾角約40°,且向東傾沒。比 較 FY-FY'剖面三義斷層前緣位置,本區預估之三義斷層前緣較更為西側約 400 公尺。而東側的頭嵙山向斜,底部之頭嵙山層與卓蘭層交介面,約為500 公尺深,交界深度較北段 FY-FY'稍增,且由交界面地層位高差,可推斷 FY2-FY2'區域受到三義斷層以及車籠埔斷層抬升影響較小。

然而 Le Béon et al.(2014)認為新社河階地的抬升以及附近區域的構造活動與車籠埔斷層較為相關(FY-FY'、FY2-FY2'之間),因其認為三義斷層於近

代並無顯著的活動影響附近的地形地貌。但根據本研究之定年資料,F1分 支斷層截切20,000年內形成之階地堆積層,以及大甲溪溪床土壤層遭SF1-SF5分支斷層截切(林啟文等人,2008;劉彥求與李奕亨,2006;梁勝雄與 陳建良,2016),新社河階地的演育,特別是該區域的抬升以及斷層滑移量, 建議考慮位於車籠埔斷層西側的三義斷層系統所造成的抬升以及滑移量, 並納入計算。



圖 91 FY-FY'以及 FY2-FY2'剖面。此二剖面對齊同一 X 坐標,由圖可見得三義斷層前緣於近地表位置的變化, FY-FY'位於 FY2-FY2'北側,斷層傾角約為 30°,斷層前緣偏東; FY2-FY2'位於南段,斷層前緣偏西約 500 公尺, 且斷層傾角為 40°大於 FY-FY'剖面範圍內之斷層傾角。此外,河階堆積礫石層於豐原地區厚度約 8-10 公尺,以本 剖面的尺度下為地表粗線之厚度,並未上色。豐原市區部分淺鑽(50m)投影標於 FY-FY'剖面。



圖 92 地質構造剖面位置示意圖。(地質圖改自張憲卿,1994;何信昌與陳 勉銘,2000;李錦發,2000;羅偉等人,2000)

5-5-4 三義斷層的地下三維構造

本研究綜合三義斷層北段以及南段之剖面,以立體圖(block-diagram)方 式展示三義斷層北段至南段,各地層於地下的分布情形(圖 93)。由各剖面 組成的立體圖顯示三義斷層南段后里-豐原地區,剖面顯示三義斷層下盤的 地層受到斷層擾動較不明顯,頭嵙山層(Tk)和卓蘭層(Cl)維持近乎水平的地 層交界面。

由南往北觀察,若以桂竹林層(Kc,淺藍色)作為參考層,可發現於豐原 地區,三義斷層將桂竹林層推至地表,而較老的東坑層(Te)並未受到斷層作 用抬升至近地表;再向北觀察至后里地區,三義斷層將部分的東坑層(Te)錯 動至近地表,且上盤形成大安背斜;而后里地區以北,大安溪至三義區域, 斷層直接將東坑層推至近地表,斷層上盤有著一系列的褶皺,褶皺軸近乎與 斷層跡平行。

統計三義斷層各區段的近地表斷層面傾角。近三義地區為18°向東傾沒, 而至后里台地北側斷層面轉為約20°向東傾沒;后里台地面斷層傾角約42° 向東傾沒;豐原地區斷層面傾角則介於30°-40°向東傾沒。而根據以上資料, 統整為圖表如圖94,顯示三義斷層北段為低角度(20°)逆衝斷層,由北而南 至后里地區近地表斷層面傾角漸增至42°,再向南之豐原地區,斷層面角度 介於30°-40°變化。



圖 93 三義斷層立體圖。本研究以各區段的剖面組合,展示三義斷層各區段(北至南),近地表的構造變化。由圖顯示 三義斷層南段上盤出露晚中新世桂竹林層,斷層面傾角約 30°;后里地區斷層面傾角約 42°,斷層上盤大安背斜軸部 出露晚中新世東坑層,西翼則為桂竹林層;大安溪以北,斷層傾角約 20°,上盤出露中新世東坑層。



圖 94 三義斷層各區段近地表斷層面角度變化圖。X 軸起始點為三義地區 依次向南為后里、豐原地區,分別以黑色箭頭標示於X軸上。

5-6 三義斷層各段層位落差

層位落差(stratigraphic throw)為表示地層因斷層做用後,造成上下盤地 層錯移,垂直方向上的相對位移量。因此,藉由計算三義斷層跡上各區段的 層位落差,能做為評估斷層的總抬升量。而為了計算層位落差,研究區域內 各地層的厚度值亦是關注的焦點,本研究彙整前人匯整之研究區域內各地 層厚度,或台灣中油公司於台中地區之深鑽資料(張憲卿,1994; Chang, 1971) 如下表 12。然而台中區域為一盆地,僅以鄰近之 HL-1 鑽井資料之層厚判 定層厚尚顯不足,盆地北緣與盆地中心各層厚度可能不同,因此再引用 Chang(1971)以震測與八卦山 PKS-1 與 PKS-2 鑽井資料所繪製之錦水頁岩頂 部等厚圖,計算三義斷層后里-豐原區域之層位落差變化,計算結果如圖 96。 (1)以各地層最厚做計算,並根據 Meng(1963)認為斷層面發育自東坑層底部, 層位落差最大為近三義地區 4700 公尺;(2)后里台地東側,根據 HL-1 顯示 之桂竹林層(329 公尺)與錦水頁岩(310 公尺),在加上錦水頁岩頂部深度約 3000 公尺,層位落差最大為 3600 公尺;(3)豐原市區則根據 HL-1 所示之桂 竹林層(354 公尺)、錦水頁岩(161 公尺)加上錦水頁岩頂部約 3800 公尺深, 層位落差約為3800公尺;(4)台中市東側則以同樣方法,採用 PKS-1 桂竹林 層(176 公尺)、錦水頁岩(166 公尺)計算層位落差可達 4500 公尺。



圖 95 錦水頁岩頂部等高線與 CPC 井位圖。(改自 Chang, 1971)

	大甲圖幅	TTS-1	HL-1	PKS-1	PKS-2		
地層名稱	厚度(m)						
頭嵙山層(Tk)	1200	1202	1992	2156	2110		
卓蘭層(Cl)	2000		1187	1417	1458		
錦水頁岩(Cs)	180		310	166	160		
桂竹林層(Kc)	500~900		329	176	164		
上福基砂岩(Sf)	80~150		34				
東坑層(Te)	250~650		430				
觀音山砂岩			97	157	141		
打鹿頁岩			220.3 +	196	178		
北寮層				197	176		
石底層				156	202		
碧靈頁岩				230	20		
木山層				255	199		
五指山層				301	196		

表 12 地層厚度比較表。(摘自 Chang, 1971;張憲卿, 1994)



圖 96 三義斷層各區段之層位落差變化圖。X 軸起始點為三義地區依次向 南為后里、豐原地區,分別以黑色箭頭標示於X軸上。

六、 討論

6-1 大甲溪北岸峭壁地層年代

由於 F1 分支斷層截切之砂層年代經校正後為最年輕可能為 6411 Cal BP,最老為 19589 Cal BP,而將各標本的校正年代和採樣地點相對高程做 比較如圖 97,顯示在7公尺之厚度內的砂層,最上層(7公尺)與最下層(0公 尺)年代差異超過 10,000 年,定年結果並無良好的一致性。而觀察採樣區域 內,雖露頭面無生長茂密的植被覆蓋,但鄰近區域內植被茂盛,推測於崩塌 前,露頭面可能有植生覆蓋,因此推斷部分標本內之有機物可能受到崩塌前 植生根系的汙染,定年結果較年輕,造成砂層年代相差超過一萬年的結果。 此外根據階地堆積層年代(十數萬年前至全新世 11,700 年前),以及該露頭 鄰近大甲溪河道,本研究認為應以該砂層的最老年代保守估計,並排除環境 汙染之因素,採信 N160926-C14-3 標本 19589 Cal BP 作為該砂層之沉積年 代較為可靠,且定義該砂層為晚更新世沉積階地堆積層。



圖 97¹⁴C 校正後年代與採樣地點高程比較圖。X 軸為校正年代, Y 軸為各 標本的相對高程,標本編號以紅色標示,年代以藍色字體標示。

6-2 三義斷層上盤之年平均抬升速率

本研究假設大甲溪北岸峭壁上之地形面,於F1分支斷層活動之前為同 一地形面(意即該地形面高程差異為 F1 活動所造成),且該區地形受到風化 侵蝕做用甚小, F1 下盤地塊並無抬升,評估三義斷層造成其上盤地殼的年 平均抬升量。以位於斷層上盤之地形面最高處,與斷層下盤地形面平坦處的 高程差異量,除以斷層可能的活動年代,有以下關係式:

根據 F1 斷層下盤砂層的定年資料,顯示三義斷層至少於 19589 Cal BP 活 動過,以UAV 影像測繪之地形面顯示,大甲溪北岸星科路之地形面高程差 約為 10 公尺(圖 98)。然而,以五米網格 DTM 製作 F1 斷層上之地形剖面, 顯示鄰近 F1 斷層上之地形,高差可達 25 公尺,大於星科路之 10 公尺高差。 本研究認為,星科路之地形崖可能已被人工修飾,或因鄰近大甲溪受到大甲 溪的侵蝕而成現今高差較小之地形崖。因此,本研究選用地形崖對保存較為 良好之地形面,高差25公尺的地形崖計算上盤地塊的平均抬升速率。而經 計算,結果顯示抬升速率最小約為 1.28 mm/vr(以 19589 Cal BP),最大為 3.89 mm/yr(以 6411 Cal BP 計算)。

比較施國偉(2008)以大安溪剖面計算三義斷層主斷層長期滑移速率,結 果為約 15.1 mm/yr, 換算後三義斷層上盤年平均抬升速率約為 5.16 mm/yr, 相較本研究計算最大抬升速率 3.89 mm/yr、最小 1.28 mm/yr, 分別相差 1.3 倍和 4 倍。比較結果顯示造成斷層上盤最大地塊抬升量之主斷層, 並非 F1 分支斷層,主斷層可能的位置應位於南岸 F4 斷層位置,且主斷層活動造成 之地形崖已被大甲溪侵蝕殆盡。



圖 98 臨大甲溪北岸地形陰影圖與地形剖面圖。箭頭所指位置為 F1 斷層可 能造成之地形崖頂部(箭頭所指),臨大甲溪之地形面崖高差可達 25 公尺(本 影像經由經濟部中央地質調查所提供之空載光達數值地形資料產製)。

6-3 三義斷層之活動斷層跡位置

三義斷層之斷層跡目前出現二種版本:(1)經濟部中央地質調查所版本; (2)陳文山等人(2000)、Chen et al.(2003)三義斷層主斷層、三義斷層分支斷層 -后里斷層。該二版本之三義斷層於大安溪以北位置相同,然而至大安溪以 南后里地區,陳文山等人(2000)、Chen et al.(2003)認為造成現今地形面傾動 的斷層為后里斷層,推測三義主斷層已被晚更新世之後沉積之礫石掩覆。

6-3-1 后里地區三義斷層活動斷層跡

陳文山等人(2013)、陳文山等人(2000)、Chen et al.(2003)所提出之三義 斷層主斷層位置,位於后里地區,比較中油 HL-1 井(4.599 公里深,位置請 參閱圖 35、圖 36),並未發現三義主斷層,且該井顯示地層之層序正常, 岩層並未受到明顯擾動,因此本研究認為,三義斷層主斷層,應未延伸至近 地表造成后里地區地殼的變形,且位置應於 HL-1 井之西側。然而,后里地 區三義斷層活動跡的位置,依據地表線形與鑽井和槽溝資料,定義為三義斷 層之最活躍的位置(后里斷層),並將三義斷層主斷層位置和后里斷層位置之 間,設為活動斷層可能之影響範圍(圖 99(a)黃色區域)。

6-3-2 豐原地區三義斷層活動斷層跡

三義斷層南段,考量平原區地表線形可能已被大甲溪侵蝕,且 Chen etal.(2003)后里斷層位置並無直接證據足以畫定位置,本研究以豐原市區之 鑽井資料搭配地電阻剖面作為三義斷層活動跡位置控制點,上盤為青灰色 砂岩,下盤為階地堆積層接觸之位置,定義為三義斷層之活動斷層跡位置。 而根據大甲溪露頭斷層帶寬約 500 公尺,劃定上盤斷層帶影響範圍。其餘 無鑽井資訊或是野外露頭作為位置控制點區域,則依照 v 形法則(v shape rule)依等高線變化,繪製末端斷層跡與車籠埔斷層相接(圖 99,紫色虛線)。



圖 99 各版本三義斷層跡和鄰近活動斷層跡。(a)黃色區域為主斷層和支斷 層可能的影響範圍。桃紅色區域為上盤斷層帶,寬約 500 公尺(本影像經由 經濟部中央地質調查所提供之空載光達數值地形資料產製)。

6-4 三義斷層的活動性

根據¹⁴C 定年結果,可判定 F1 分支斷層截切之最年輕地層,約 19589 Cal BP 沉積的階地堆積層,且位於斷層帶最接近地表、最前緣的分支斷層, 因此本研究將 F1 分支斷層列為大甲溪三義斷層帶中最活躍的分支斷層。 然而為了討論三義斷層鄰近區域與其他活動構造的活動性,本研究參考 Lin et al.(2010), GPS 速度場資料(GPS 資料為西元 2003 年至 2005 年)。鄰近三 義斷層區域各 GPS 連續站的速度場列於表 13。其中,三義斷層東側 SOAN(14 mm/yr, 279°, 方位角)、HSUE(37.1 mm/yr, 304°)、NSIE(18.1 mm/yr, 286°) \ HOPN(22.4 mm/yr, 286°) \ DPIN(29.5 mm/yr, 293°) \ CHIU(32.1 mm/yr, 296°),平均速度場為25.56mm/yr,顯示三義斷層上盤東側地區,構造可能 持續活動。反觀三義斷層北段,SANI(3.9 mm/yr, 310°)、LIYU(7.3mm/yr, 276°),速度場相較於東側甚小。對照活動斷層位置圖,車籠埔斷層以及大 茅埔-雙冬斷層分別位於三義斷層上盤東側,此二位於三義斷層東側的活動 斷層,可能分散部分如 NSIE、HOPN、DPIN 和 CHIU 的速度場分量,因此 造成西部平原測得之速度場甚小。然而,HSUE、SONA 测站附近並無活動 構造切割分區,該區域地殼活動的能量可能直接累積於三義斷層北段區塊, 且三義斷層北段區域之速度場較小(SANI 測站),本研究判定三義斷層北段 目前可能處於累積能量的狀態。而由以上 GPS 連續站觀測資料, 搭配活動 斷層之位置比較以及 F1 分支斷層截切約 20000 年內沉積之砂層,顯示三義 斷層再活動的可能性存在,且至少於晚更新世有活動紀錄。



觀測資料摘自 Lin et al., 2010)。

表 13 三義斷層鄰近區域 GPS 連續站速度場資料。 V_E 為水平向東方相之速 度場; V_N 為水平向北之速度場; V_U 為垂直方向的速度場;V 為水平方向 平均速度場。(摘自 Lin et al., 2010)

Station	V _E (mm/yr)	V _N (mm/yr)	V _U (mm/yr)	V(mm/yr)	Azimuth(°)
CHIN	1	-4.0	-8.7	4.2	166
CHIU	-28.9	14	4.2	32.1	296
CHUA	-2.8	-2.1	-3.2	3.5	234
DAHU	-8.3	0.5	-1.8	8.3	274
DPIN	-27.1	11.6	8.4	29.5	293
FUNY	2.7	-4.8	-48.0	5.6	151
HSUE	-30.9	20.6	-13.9	37.1	304
HOPN	-21.6	6.1	5	22.4	286
LIYU	-7.3	0.7	0.7	7.3	276
LUKN	-3.9	-3.1	-4.1	5	231
MIAO	-2.8	0.8	-3.1	2.9	285
NSHE	-17.4	4.8	2.3	18.1	286
PENL	-18.0	9.3	8	20.2	297
PLAN	-6.4	10.9	-0.1	12.6	330
PUSN	-0.2	0.3	-16.3	0.4	332
SANI	-3.0	2.5	-9.6	3.9	310
SONA	-12.6	6.4	-0.5	14.2	297
TEGS	-2.5	-0.6	-3.0	2.6	257

6-5 三義斷層南北段的構造差異

由地質剖面資料,可歸納出(1)三義斷層大安溪以北,下盤地層折曲, 上盤發育一系列褶皺,東坑層出露;(2)后里地區,下盤地層折曲不明顯,斷 層上盤發育大安背斜,且可見桂竹林層於大安背斜西翼近地表。

Meng(1963)針對三義斷層北段的構造演化,提出見解。其認為該區域斷 層下盤地層折曲,乃是因為斷層發育後期,斷層前緣受阻,但斷層持續活動 造成下盤劇烈變形,而斷層上盤亦發育一系列的褶皺(圖 11、圖 21、圖 22)。 然而,比較本研究所繪之地質剖面,三義斷層南段大安溪以南,由剖面顯示 下盤並無顯著變形,顯示三義斷層於該區發育時前緣受阻的情形較輕微。再 者,觀察鄰近區域活動構造,后里地區東南方的車籠埔斷層,可能將來自於 更東側山麓地區傳遞的地殼形變能量吸收,使下盤岩層無明顯變形。

三義斷層於后里地區,斷層截切紅土礫石層(約為 10 數萬年)、大甲溪 南岸,三義斷層截切沖積層(1 萬年內),該二處斷層所截切的地層年帶相差 超過萬年,且豐原地區和后里地區的近地表岩層年帶相差甚遠,前者為階地 堆積層後者為紅土礫石層,亦顯示斷層的活動性可能不同。南段豐原地區三 義斷層於較近代有活動紀錄,而后里地區以北則無斷層較近代的活動證據, 而根據以上事證,本研究推論(1)三義斷層可能並非南北段同時活動所造成, 很可能大甲溪以北為較早活動之區域,而斷層近代的斷層活動主要集中於 大甲溪以南區域;(2)一東西走向之地下構造(約莫大甲溪位置),將三義斷層 區隔造成大甲溪南北岸三義斷層之近地表地質構造有所差異。此外,三義斷 層末端層位落差尚存在約 4600 公尺,斷層直接消滅可能性低,推論三義斷

七、 結論與建議

整合鑽井資料、地電阻調查結果和野外調查結果,本研究建議三義斷層 之活動斷層跡,於豐原地區以中新世桂竹林層最前緣(最西側)和晚更新世之 後沉積的礫石層交界位置投影至地面,且設斷層上盤 500 公尺範圍內為斷 層影響帶。后里地區則依照地表線形以及鑽井資料書設斷層跡。而層位落差 顯示三義斷層北段(大安溪以北)三義地區最大(4700公尺), 至后里地區漸減 (3600 公尺),豐原地區再增加(4600 公尺)。此外,三義斷層各段附近地下構 造亦有所不同:(1)三義地區大安溪以北,斷層下盤受到斷層擾動,岩層呈 現折曲貌,且斷層上盤出露中新世東坑層,近地表斷層傾角約20°;(2)后里 台地東側,斷層下盤地層交界面近平平整,近地表斷層傾角約 40°-50°,斷 層上盤區域形成大安背斜,背斜西翼於近地表可見桂竹林層,軸部出露晚中 新世東坑層;(3)大甲溪以南,豐原市區地電阻剖面以及鑽井資料顯示,三 義斷層已被8-10公尺厚之階地堆積層覆蓋,斷層上盤為晚中新世桂竹林層, 近地表斷層傾角約 30°-40°。大甲溪三義斷層帶經判識,寬度約為 500 公尺, 由至少四條錯移量不等的分支斷層(F1-F3)與主斷層(F4)組成,且F4 主斷層 截切低位河階砂層。三義斷層的活動性,碳十四定年結果顯示 F1 分支斷層 截切約最老可能為 19589 Cal BP 之階地堆積層,顯示三義斷層極大可能於 晚更新世至全新世之間活動過。西元 2003-2005 之 GPS 速度場資料顯示, 斷層上盤地塊持續活動,且三義斷層北段區域內無活動斷層等活動構造吸 收該區域地殼變形的能量,極大可能使能量累積至三義斷層前緣,因此本研 究建議未來可加強三義斷層沿線地殼形變之觀測,更進一步了解三義斷層 與鄰近活動構造的活動性。
八、 參考文獻

- 石再添、張瑞津、楊貴三,「后里臺地的活斷層與地形面」,中國地理學會, 46-55頁,1983。
- 古兆禎,「台灣地型發育與地殼運動之關係」,中國地質學會會刊,第8號, 102-105頁,1965。
- 何信昌、陳勉銘,「五萬分之一台灣地質圖台中圖幅」,經濟部中央地質調查 所,2000。
- 李錦發,「三義斷層及其在新構造上的意義」,地質,第14卷,第1期,73-96頁,1994。

李錦發,「五萬分之一台灣地質圖東勢圖幅」,經濟部中央地質調查所,2000。 沈淑敏、張瑞津、楊貴三,「地震地質調查及活動斷層資料庫建置-活動構造

地質及資料庫建置分析(1/2)」,經濟部中央地質調查所,2005。 邱華燈,「臺中縣大安背斜震波測勘之結果及其解釋」,中國地質學會專刊,

第1號,187-188 頁,1962。

林啟文、盧詩丁、石同生、林偉雄、劉彥求、陳柏村,「台灣中部的活動斷

層二萬五千分之一活動斷層條帶圖說明書」,經濟部中央地質調查所

特刊,第二十一號,2008。

- 林朝棨,「台灣地形」,台灣省文獻委員會,台灣省通志稿,卷1,第1冊, 1957。
- 侯進雄、費立沅、邱禎龍、陳宏仁、謝有忠、胡植慶、林慶偉,「空載光達 數值地形產製與地質災害的應用」,航測及遙測學刊,第18卷,第2 期,93-108頁,2014。

施國偉,「三義斷層上盤區域活動構造之研究以枕頭山-卓蘭地區為例」,國

立臺灣大學地質研究所,碩士論文,2008。

- 張瑞津、鄧國雄、劉明錡,「苗栗丘陵河階之地形學研究」,國立台灣師範大 學研究報告,97-112頁,1998。
- 張憲卿,「五萬分之一台灣地質圖大甲地質圖」,經濟部中央地質調查所, 1994。
- 張麗旭,「三叉衝上斷層及其附近之地質構造」,台灣省地質調查所彙刊,第 3號,1951。
- 陳文山、陳于高、劉聰桂、黃能偉、林清正、宋時驊、李昆杰,「九二一集 集大地震的斷層特性與構造意義」,經濟部中央地質調查所特刊,第 12號,139-154頁,2000。
- 陳文山、游能悌、楊小青,「重要活動斷層構造特性調查研究計畫 斷層活動 特性分析與評估期末報告」,經濟部中央地質調查所,2013。
- 梁勝雄與陳建良,「臺灣中部地景四驚奇」,科學研習,第55卷,第四期,

48-57頁,2016。

- 黃鑑水與張憲卿,「臺中縣大甲溪右岸之三義斷層露頭」,地質,第14卷, 第1期,248-249頁,1994。
- 葉明官、黃旭燦、賴招輝、王明惠、紀怡光、陳典男,「臺灣西北部苗栗縣 關刀山-臺中后里地區地質構造」,台灣石油地質,第 40 期,1-28 頁,2013。
- 劉彥求與李奕亨,「三義斷層於大甲溪兩岸剖面與淺層震測結果比對分析」, 台灣地區地球物理學術研討會摘要集,2006。

劉聰桂,「碳十四定年法」,地質,第16卷,第1、2期,125-139頁,1997。 羅偉、吳樂群、陳華玟,「五萬分之一台灣地質圖國姓圖幅」,經濟部中央地 質調查所,2000。

Bemis, S. P., S. Micklethwaite, D. Turner, M. R. James, S. Akciz, S. T. Thiele, and H. A. Bangash, "Ground-based and UAV-Based photogrammetry: A multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology", Journal of Structural Geology, Vol. 69, pp. 163-178, 2014.

- Chen, W.-S., Y.-G. Chen, R.-C. Shih, T.-K. Liu, N.-W. Huang, C.-C. Lin, S.-H. Sung, K.-J. Lee, "New-Chelungpu-terraces", Journal of Asia Sciences, Vol. 21, pp. 473-480, 2003.
- Chen, W.-S., K.-J. Lee, L.-S. Lee, D. J. Ponti, C. Prentice, Y.-G. Chen, H.-C. Chang, and Y.-H. Lee, "Paleoseismology of the Chelungpu Fault during the past 1900 years", Quaternary International, Vol. 115-116, pp. 167-176, 2004.
- Chang, S. S.-L., "Subsurface geologic study of the Taichung basin, Taiwan", Petroleum Geology of Taiwan, No. 8, pp. 21-45, 1971.
- Hung, J.-H. and Wiltschko, D. V., "Structure and Kinematics of Arcute Thrust Faults in the Miaoli-Cholan Area of Western Taiwan", Petroleum Geology of Taiwan, Vol. 28, pp. 59-96, 1993.
- Le Béon, M., J. Suppe, M. K. Jaiswal, Y.-G. Chen, and M.E. Ustaszewski, "Deciphering cumulative fault slip vectors from fold scarps: Relationships between long-term and coseismic deformations in central Western Taiwan", Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Vol. 119(7), pp. 5943-5978, 2014.
- Lin, K.-C., J.-C. Hu, K.-E. Ching, J. Angelier, R.-J. Rau, S.-B. Yu, C.-H. Tsai, T.-C. Shin, and M.-H. Huang, "GPS crustal deformation, strain rate, and seismic activity after the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan", Journal of Geophysical Research, Vol. 115(B7), pp. 1-22,2010.
- Meng, C.-Y., "The San-i Overthrust", Petroleum Geology of Taiwan, No. 2, pp. 1-20, 1963.
- Marshak, S. and Mitra, G., Basic Methods of Structural Geology., Prentice Hall., Englewood Cliffs, New Jersey., 1988.
- Ota, Y., M. Watanabe, Y. Suzuki, and H. Sawa, "Geomorphological identification

of pre-existing active Chelungpu Fault in central Taiwan, especially its relation to the location of the surface rupture by the 1999 Chichi earthquake", Quaternary International, Vol. 115-116, pp. 155-166, 2004.

- Ota, Y., Y.-G. Chen, and W.-S. Chen, "Review of paleoseismological and active fault studies in Taiwan in the light of the Chichi earthquake of September 21, 1999", Tectonophysics, Vol. 408(1-4), pp. 63-77, 2005.
- Ramsay, J. G. and M. I. Huber, Morden Structural Geology. Vol.2 Folds and Fractures., Academic Press., Harcourt Jovanovich., 1987.
- Rowland, S. M., E. M. Duebendorfer and I. M. Schiefelbein, Structural Analysis and Synthesis A Laboratory Course in Structural Geology., ExxonMobile Corporation, Houston, Texas., ed. 3. 2007.
- Ruzgienė, B., T. Berteška, S. Gečyte, E. Jakubauskienė, and V. Č. Aksamitauskas, "The surface modelling based on UAV Photogrammetry and qualitative estimation", Measurement, Vol. 73, pp. 619-627, 2015.
- Smith, M. J., J. Chandler, and J. Rose, "High spatial resolution data acquisition for the geosciences: kite aerial photography", Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 34(1), pp. 155-161, 2009.
- Stumpf, A., J.-P. Malet, N. Kerle, U. Niethammer, and S. Rothmund, "Imagebased mapping of surface fissures for the investigation of landslide dynamics", Geomorphology, Vol.186, pp. 12-27, 2013.
- Tang, C.-H., "Photogeologic interpretation of the Miaoli area Taiwan", Proceedings of the Gological society of China, No. 12, pp. 11-19, 1969.
- Wang, C.-Y., C.-L. Li, F.-C. Su, M.-T. Leu, M.-S. Wu, S.-H. Lai and C.-C. Chern, "Structural mapping of the 1999 Chi-Chi earthquake fault Taiwan", Terrestrial, Atmospheric and Oceanic sceinces joural, Vol. 13(3), pp. 16, 2002.
- Yue, L.-F., J. Suppe, and J.-H. Hung, "Structural geology of a classic thrust belt earthquake: the 1999 Chi-Chi earthquake Taiwan (Mw=7.6)", Journal of Structural Geology, Vol. 27(11), pp. 2058-2083, 2005.





A. 鑽井紀錄、岩心柱狀(井錄:中央地質調查所) Sanyi-1A Sanyi-1B

Sanyi-2A

Sanyi-2B



Sanyi-2C



Sanyi-2D



Sanyi-3A



Sanyi-3B





Sanyi-4A





Sanyi-4C



I Sandstone I vf f m c vc f Gravel m c vc 7-2.7m: 黃褐色粉砂層,泥質粉 砂為主,多有斑駁狀紋理,海選度 良好,全段皆含粗砂,推斷為河流 相氾濫平原沖積物,本層可能為全 新世沖積層。 2.7-50m: 黃褐色礫石層,中至粗 礫,滴選度差,石英砂岩礫石呈現 次圖形,風化度中等。基質為中至 粗砂。推斷此層為全新世沖積層。

Sanyi-4D

C

10-

20

30

40



B. 地電阻剖面影像







C. 大甲溪三義斷層帶正射影像

