### 國立中央大學

應用地質研究所 碩士論文

探討甲仙地震之地表破壞與觸發斷層之關係

**Study of the Relationship between Surface Rupture and Faulting in Relation to Jiashian Earthquake** 

> 研究生: 黃 意 茹 指導教授: 黃 文 正 博士

中華民國 一百零二 年 六 月

· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
(101 年 9 月最新修正版)
本授權書授權本人撰寫之碩/博士學位論文 <u>全文電子檔</u> (不包含紙本、詳備註1說 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) () <u>同意</u> (立即開放) (√) <u>同意</u> (請於西元 <u>&gt;&gt;15</u> 年 <u>8</u> 月 <u></u> 日開放) () <u>不同意</u> ,原因是:
在國家圖書館「臺灣博碩士論文知識加值系統」
<ul> <li>( )<u>同意</u>(立即開放)</li> <li>(√ )<u>同意</u>(請於西元 <u>&gt;ol⊊</u>年<u>8</u>月<u></u>日開放)</li> <li>( )<u>不同意</u>,原因是:</li> </ul>
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: 黄青艽 學號: 100624016
論文名稱: 探討甲仙地震之地表破壞與觸發斷層之關係
指導教授姓名:黄文正
系所 : 應用地質研究 所 □博士班 ■碩士班
<ul> <li>備註:</li> <li>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。</li> <li>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)。</li> </ul>
3 善請加印——份留理之授權書,值宿並親筆笨久後,於她理難於時茲圖書館(1)/纮—伊輔家经

### 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>黃意茹</u>研究生所提之論文 <u>探討甲仙地震之地表破壞與觸發斷層之關係</u> 係由本人指導撰述,同意提付審查。

指導教授 斎文正 (簽章)

10-1年\_7月\_25日

101.06.15

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>黃意茹</u>研究生 所提之論文

<u>探討甲仙地震之地表破壞與觸發斷層之關係</u> 經本委員會審議,認定符合碩士資格標準。

	學位委	1考	試委員	· 會召集人 _ 員 _ -	TT T	和中国王王			
中	華	民	國	一百零二	年	六	月	++	 D2.06.15

#### 探討甲仙地震之地表破壞與觸發斷層之關係

#### 摘要

地震斷層作用造成的近地表變形為地震災害中人工建物損毀主 因之一,利用受損建物的分布與地表變形特徵,將可有效地提供地震 斷層的相關資訊。甲仙地震(Mw=6.4)於嘉義、台南和高雄地區引起地 表破裂、建築物損毀等災害,本研究蒐集甲仙地震造成的破壞及前人 野外調查的資料加以統整,依破壞形式分類成地表破裂、建築物損壞 與土壤液化三種,其中地表破裂主要集中在高雄市美濃區一帶,以一 系列具方向性的開張型地表裂隙形式出現;地表裂隙出現地點可分成 五個區域,約呈西北東南向破壞帶。依地表裂隙走向及性質,將其分 成三組,其中一組裂隙走向為230°±30°,判斷其成因明顯與人造建物 的結構無關,推測可能與斷層作用相關。建築物損壞與土壤液化現象 多與震波、地質條件及建物本身強度有關,本研究不多加以討論。

透過尖峰地動應變(peak ground strain)分析和彈性半無限空間斷 層錯位模擬,探討地表裂隙的成因。結果顯示震波引致的地動應變雖 已達地表破裂門檻,但無法佐證破壞具方向性;據地球物理及本研究 彙整的地表破裂資料,作為模擬的參考依據,模擬所得的近地表變形 之大小及可能的破裂形式皆與美濃區之地表裂隙相符,故本研究推論 這組地表裂隙與斷層錯動有密切關聯,其破壞帶分布反映該處地震斷 層雖未穿破地表但已極接近地表面(數公尺或數百公尺),其位置及走 向可粗略的反映斷層空間幾何形貌。

活動斷層錯動具週期性,且引致地表變形也具重複性,本研究結果指出甲仙地震其觸發地震之盲斷層的可能空間幾何位置及其可能

i

造成近地表變形範圍,提供該區未來地震防災相關之參考。

關鍵字: 甲仙地震、地表裂隙、斷層錯動、盲斷層

## Study of the Relationship between Surface Rupture and Faulting in relation to Jiashian Earthquake

Huang, I-Ju

#### ABSTRACT

Near-surface deformation induced by earthquake faulting is one of main causes to the damage of engineering structures during earthquakes. In return, the information of distribution of damaged engineering structures and features of surface deformation can reveal important characteristics of the earthquake fault. The 4 March 2010 Jaishian, southwestern Taiwan, earthquake (M<sub>w</sub>6.4) caused moderate damage in Chiavi, Tainan and Kaohsiung including ground surface fractures, engineering structure damage and soil liquefaction. This study collects and collates all the data from the reports of the earthquake-induced engineering structure damage by earthquake engineers and field fracture investigation by geologists. The collated result shows there were dense surface fractures locally distributed within open-type an northwest-trending rupture zone at Meinong in Kaohsiung. The surface fractures can be divided into three sets according to their characteristics. The formation of one set of the fractures which oriented in azimuth of 230°± 30° likely resulted from the earthquake faulting because of no evidence connected with the weakness of engineering structures. The locations of densely damaged buildings may reflect the information of the hanging wall of the earthquake fault. The phenomenon of soil liquefaction is usually related to seismic shaking and the property of geomaterial at sites.

The formation mechanisms of these fractures will be studied via analyzing dynamic (peak ground) strains derived from peak ground velocities and static strains produced from an elastic half-space dislocation model. The result of the dynamic strain analysis shows that the cause of fracturing due to the seismic shaking cannot be ruled out because the magnitude of the strains could reach the threshold of ground failure but there is no evidence for the directional characteristic. On the contrary, open-type fractures and their orientation of 230°± 30° in azimuth produced from the near-surface modeled static strains are consistent with those discovered in field investigations. Thus, this study suggests the set of surface fractures is closely associated with the Jaishian earthquake faulting. Furthermore, the fracture-distributed rupture zone may infer that the earthquake fault might almost reach the ground surface (tens or hundreds of meters beneath) ; its location and orientation roughly reflects the same properties of the fault.

The activation of an active fault is repeating and probably cyclical. So is its induced ground deformation. This study highlights the accuracy of location of a blind fault associated with Jaishian earthquake and extent of its activation-resultant near-surface deformation. These results shall provide valuable information for mitigating earthquake hazard in southwestern Taiwan.

Key words : Jaishian earthquake, surface fractures, earthquake faulting

誌 謝

本篇論文能如期順利完成並取得碩士學位,首先要特別感謝恩師 黃文正老師對像我這樣跨系的學生給予很大的幫助,耐心地一步一步 引導、教導我,無論是在專業知識的傳授、論文方向、研究方法、研 究態度、人生規劃等,也謝謝老師願意跟我分享人生中可能面對到的 種種問題及關卡,讓我在這兩年碩士生涯學到了很多東西!同時,非 常感激張中白老師、李建成老師與景國恩老師能撥空擔任口試委員, 並給予指正及許多建議,使得內容能更加完整。另外,感謝國家地震 中心提供 TAMIP 測站資料及張中白老師、經濟部中央地質調查所劉 彥求先生提供野外調查資料,使得研究能順利進行。

一開始來到中央,面對這陌生的環境,感謝有這麼歡樂溫馨的實驗室收留我,同時讓我認識這兩年來最好的奮鬥夥伴-劭禎,也謝謝實驗室每一位成員,大學長根根、18、詩婷、芊翔在學業、論文及野外上的幫助,更謝謝你們在我低潮時包容我、逗我開心!另外,感謝親切又漂亮的助理小草、小貝對我的照顧,特別是小貝一直以來給我的鼓勵、信任及支持,你的話我深深地印在心中,沒有你的這些話我是不可能撐下來的,真的非常感謝你!!

謝謝在中央認識的同學、學姊學弟妹們,小豬、大龍、芊芊、楊 鈞、冠亮、大芬、子川、筱涓、老牙、柑仔、俊融、玲絲、芝帆學姊 對我在各方面的幫助,也讓我在忙碌之餘,有許多一起玩樂的快樂時 光!大學的麻己,布、點、543,儘管我們分隔各地,各忙各的,且 研究領域也大不相同,但是你們總是願意聽我訴說任何事情,了解我 的心情,給我鼓勵,真的很謝謝你們!另外,特別特別感謝最好最重 要的朋友小巴,即使我們一直以來都在不同的地方奮鬥著,但我們總 是互相扶持互相鼓勵,這兩年裡,我知道背後有你的支持,即使遇到 跌倒了,也有可以站起來的勇氣,在我人生的下個階段,也請你繼續 陪伴我!還有,夫人我絕對沒有忘記你,國中、高中、大學的生活四 周總是有你,害我在研究所還真有點不習慣,哈!

最最感謝在我人生所有階段裡給予我無限關懷與支持、不管任何 時候都相信我可以做到的家人們,靖樺姊你是我最愛的媽媽,也是我 最好的朋友,謝謝你總是聽我訴苦抱怨,分析道理給我聽,也謝謝阿 豪,即使你不善於表達,但每當我收到你寄的家書時,真的非常的感 動!謝謝我的帥哥叢林 boy,總是讓我有許多驚嚇加歡喜!謝謝我最 愛的外婆,我知道有你在等我回家陪你聊天,聽你的笑聲,心裡總是 暖暖的。最後謹向每位曾幫助過、鼓勵過我的人致上最誠摯的謝意。

## 目 錄

摘要		i
ABS	TRA	CTiii
誌	謝	V
目	錄	vi
圖	目	錄ix
表	目	錄xii
照	片	目 錄xiii
第一	·章	緒論1
	1.1	前言1
	1.2	研究動機與目的2
第二	章	文獻回顧
	2.1	2010年甲仙地震9
		2.1.1 震源機制與餘震分佈之推估斷層面位態10
		2.1.2 推估甲仙地震之滑移量與斷層面位置11
		2.1.3 其他相關研究
	2.2	甲仙地震與旗山轉換斷層帶(Chishan Transfer Fault Zone,
		CTFZ)
	2.3	災害性地震—以1994 年美國洛杉磯北嶺地震(Northridge
		earthquake)為例15

第三章	研究區	域與地質	了概述
3.1	研究	區域構造	皆景31
3.2	研究區	區域地形 <sup>1</sup>	也質概述31
	3.2.1	研究區	域地形概況31
	3.2.2	研究區	域地質簡介32
3.3	鄰近氵	舌動斷層。	
第四章	資料茀	集與研究	尼方法
4.1	現地貢	資料收集業	彙整與分類
4.2	強地重	防資料與	應變關係41
4.3	彈性斗	半空間錯動	動模型(Elastic half-space dislocation model) 44
	4.3.1	彈性半	空間錯動模型原理44
	4.3.2	參數效	應47
		4.3.2.1	斷層傾角對地表應變量的影響47
		4.3.2.2	斷層距地表深度對地表應變量的影響48
		4.3.2.3	滑移量大小對地表之應變量的影響48
第五章	資料分	析與研究	已結果60
5.1	地表码	皮裂出現化	立置與走向性統整60
	5.1.1	高美醫	護管理專科學校60
	5.1.2	小山社	區62
	5.1.3	文昌宮	
	5.1.4	龍肚街	口與龍肚國中65

	5.1.5	竹子門			 66
5.2	強地動	<b>b</b> 資料計算結	果		 70
5.3	彈性半	- 無限空間斷	層錯位模擬	結果	 71
第六章	討論		•••••		 98
6.1	模擬結	古果與地表裂	隙方向比對		 98
6.2	強地動	的資料分析結	果與模擬結	课討論	 100
6.3	與前人	研究推斷之	斷層面位置	比較	 101
第七章	結論				 108
參考文鬳	犬				 111

## 圖 目 錄

圖 1.1	臺灣地區自西元1900年以來芮氏規模大於6的災害的震央分
布。	
圖 2.1	中央氣象局 20100304 甲仙地震地震報告。
圖 2.2	甲仙地震不同單位所計算之震源機制解。
圖 2.3	甲仙地震震後五天內之餘震分布,星形為主震位置,紅線為
附近斷層	曾位置。21
圖 2.4	甲仙地震主震與幾個較大餘震震源機制解。21
圖 2.5	甲仙地震震央附近區域歷史地震震源機制解。22
圖 2.6	GPS 觀測之同震水平位移。22
圖 2.7	甲仙地震推估理想之斷層幾何與同震滑移。23
圖 2.8	由斷層模型逆推推得之錯動量分佈與餘震分佈的斷層面地表
投影。	
圖 2.9	甲仙地震成因構造概念圖及其與聯合震源逆推所得之錯動量
分佈間的	为關係。
圖 2.10	臺灣主要轉換斷層帶分布圖。24
圖 2.11	旗山轉換斷層帶(CTFZ)與推測斷層投影至地表位置的相對
位置。	

圖 2.12	台灣西南部近20年震源機制解與應力反演結果。25
圖 2.13	1994 年美國洛杉磯北嶺地震推斷 Winnetka 變形帶。26
圖 2.14	街道長度與應變量大小關係圖。
圖 2.15	北嶺地震在 Maiden 造成的地表裂隙。27
圖 3.1	研究區域之地質圖。
圖 3.2	研究區域之 AA'地質剖面圖。37
圖 3.3	臺灣活動斷層分布圖。
圖 4.1	研究方法流程。53
圖 4.2	甲仙地震造成的三大破壞方式分類與位置分布圖。54
圖 4.3	應變橢圓示意圖。55
圖 4.4	車籠埔斷層地表破裂形貌示意圖。55
圖 4.5	修自 Okada(1985)定義的斷層幾何與斷層座標系統。56
圖 4.6	初步模擬結果。57
圖 4.7	初步模擬結果之圖 4.6 黃色方框局部放大圖。58
圖 4.8	模擬斷層傾角 50°與 25°之地表應變量變化。59
圖 5.1	高雄市美濃區地表裂隙集中出現與建築物受損嚴重區域。75
圖 5.2	高美醫專地區地表裂隙與受損建物分布圖。76
圖 5.3	小山地區地表裂隙與受損建物分布圖。77
圖 5.4	竹子門地區地表裂隙與受損建物分布圖。

圖 5.5	高雄市美濃區地表裂隙分布位置與方向及建築物受損嚴重區
域。	
圖 5.6	地表裂隙走向玫瑰圖。80
圖 5.7	甲仙地震 PGV 圖。80
圖 5.8	修改初步模擬之斷層面投影至地表示意圖。
圖 5.9	甲仙地震所有破壞位置分布與在未考慮地形條件下本研究假
設斷層	面投影至地表之位置。82
圖 6.1	高雄市美濃區地表裂隙集中出現位置點套疊應變圖。104
圖 6.2	Hsu et al. (2011)繪製的 GPS 水平同震位移與其誤差。105
圖 6.3	Hsu et al. (2011) 推測斷層 面投影至地表位置與 GPS 同震位移。
•••••	
圖 6.4	Lee et al. (2012) 推測斷層 面投影至地表位置與 GPS 同震位移。
•••••	
圖 6.5	Ching et al. (2011)、Hsu et al. (2011)與 Lee et al. (2012) GPS 資
料與推;	則之斷層面投影至地表位置。106
圖 6.6	Ching et al. (2011)、Hsu et al. (2011)、Lee et al. (2012)與本研
究推測:	之斷層面投影地表位置。107

## 表目錄

表 1.1	臺灣災害地震概況	4
表 2.1	甲仙地震各單位震源機制解彙整	.18
表 2.2	前人研究之斷層模型比較	.18
表 2.3	斷層深度因子與相對深度對應關係	.19
表 4.1	斷層傾角 $\delta$ 、斷層距地表深度 $d$ 與地表應變量的關係	.50
表 4.2	斷層距地表深度 $d$ 、斷層傾角 $\delta$ 與地表應變量的關係	.51
表 4.3	滑移量、斷層傾角 $\delta$ 、斷層距地表深度 $d$ 與地表應變量關	係
		.52
表 5.1	地表裂隙於各個區域的方向	.74
表 5.2	PGV、Vs30 與 PGS 之結果	.74

# 照片目錄

照片	1.1	臺中	2豐原中」	E公園	附近之	車籠	埔斷,	層近地	也表變	形。	•••••	.7
照片	1.2	臺中	1豐原中」	E公園	九二一	·地震	地表	變形帶	声中的	構造	۰	.7
照片	2.1	高姑	生市內門[	區內門	紫竹寺	活動	中心,	嚴重損	員壞。		2	28
照片	2.2	臺南	<b>向市新化</b> 3	求場旁	三層樓	建物	的一	樓柱道	曹壓垮	·情形	•2	28
照片	2.3	嘉	養市短竹.	里小雅	路社區	區建物	相互	碰撞	導致外	牆擠	碎情开	移。
•••••			••••••					•••••	•••••	•••••	2	9
照片	2.4	臺南	向市玉井區	國中仁	愛樓震	後受	損破:	壞狀》	ℓ°		2	29
照片	2.5	臺南	向市新化[	區北勢	里土壤	液化	情形	I •	•••••		3	0
照片	2.6	臺南	向市新化[	區北勢	里土壤	液化	情形	II °	•••••		3	0
照片	5.1.1-	-1	高美醫專	·分校3	至主校	品。		•••••	••••		8	3
照片	5.1.1-	-2	高美醫專	·附近≠	こ成功に	路上顡	没隙,	裂隙死	延伸至	水泥	.護牆_	上。
								•••••			8	3
照片	5.1.1-	-3	高美醫專	前地表	長裂隙	F3 ° .		•••••			8	34
照片	5.1.1-	-4	高美醫專	前地表	長裂隙	F6 向	西延	伸至發	樂石水	:泥地	道上	0
			•••••					•••••	•••••		8	34
照片	5.1.1-	-5	高美醫專	地表黎	21日 K K K K K K K K K K K K K K K K K K K	6西	侧水	泥護制	啬延伸	₹∘	8	5
照片	5.1.1-	-6	高美醫專	地表黎	21) [19] No. 19] No. 19[ No. 19] No. 19] No. 19] No. 19] No. 19] No. 19[ No. 19] No. 19] No. 19] No. 19] No. 19[ No. 19] No. 19[ No. 19] No. 19[ No. 19] No. 19[ No. 19] No. 19[ No. 19] No. 19] No. 19[ No. 19[ No. 19] No. 19[ No. 19[ No. 19] No. 19[ No.	向西	側礫	石水氵	尼斜坡	泛延伸	°8	5
照片	5.1.1-	-7	高美醫專	·分校南	旨側之·	平行道	道路的	的地表	裂隙	°	8	5
照片	5.1.1-	-8	高美醫專	西側	平行柏:	油小徑	至的水	く泥溝	損害	°	8	6

照片 5.1.2-1	柏油路車轍疲勞破壞。.	
照片 5.1.2-2	小山社區地表裂隙 F5。	
照片 5.1.2-3	小山社區地表裂隙 F5 分	文點。87
照片 5.1.2-4	小山社區地表裂隙 F6 在	柏油路之延伸。88
照片 5.1.2-5	小山社區地表裂隙 F6 在	水泥空地上之延伸。88
照片 5.1.2-6	小山社區地表裂隙 F6 在	小礫石泥土空地上之延伸I。
•••••		
照片 5.1.2-7	小山社區地表裂隙 F6 在	小礫石泥土空地上之延伸 II。
照片 5.1.2-8	小山社區地表裂隙 F9。	
照片 5.1.2-9	小山社區地表裂隙 F10。	
照片 5.1.2-1(	) 小山社區地表裂隙 F10	往北延伸至水泥溝牆。89
照片 5.1.3-1	文昌宫區域之地表裂隙。	。90
照片 5.1.4-1	龍肚街口之地表裂隙。.	90
照片 5.1.4-2	龍肚街口北北西走向之죟	と除 I90
照片 5.1.4-3	龍肚街口北北西走向之죟	沒隙Ⅱ。90
照片 5.1.4-4	獅山街口平行中華路之步	也表裂隙。91
照片 5.1.5-1	大埼下至竹子門之右轉之	と斜坡。91
照片 5.1.5-2	竹子門地區地表裂隙 F1	•92
照片 5.1.5-3	朝南拍攝竹子門地區地表	長裂隙 F2a I。92

照片	5.1.5-4	朝南拍攝竹子門地區地表裂隙 F2a II。92
照片	5.1.5-5	朝北拍攝竹子門地區地表裂隙 F2a。93
照片	5.1.5-6	朝北拍攝之竹子門地區地表裂隙 F2b。93
照片	5.1.5-7	朝南拍攝之竹子門地區地表裂隙 F2b。94
照片	5.1.5-8	朝北拍攝之竹子門地區地表裂隙 F2b。94
照片	5.1.5-9、	5.1.5-10 朝北拍攝竹子門地區地表裂隙 F2b 尾端94
照片	5.1.5-11	在地表裂隙 F2b 尾端兩側有高低差。95
照片	5.1.5-12	地表裂隙 F15 從南側車道向竹門路 3 號延伸 I。95
照片	5.1.5-13	地表裂隙 F15 從南側車道向竹門路 3 號延伸 II。…95
照片	5.1.5-14	區段4的北側柏油小路橫切並切穿小路的裂隙。96
照片	5.1.5-15	竹子門溝溝牆及其兩旁的柏油路。
照片	5.1.5-16	獅山大圳旁橫切柏油小路的裂隙 I。
照片	5.1.5-17	獅山大圳旁横切柏油小路的裂隙Ⅱ。

xv

### 第一章 緒論

#### 1.1 前言

台灣位於歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊交會處,並處在環太平洋 地震帶上(Tsai et al., 1977),菲律賓海板塊每年以約8.2 公分的速率向 西北方向與歐亞大陸板塊擠壓碰撞(Yu et al., 1997),其碰撞交接處位 在花東縱谷,而因碰撞產生隱沒作用的,則分別是琉球島弧系統與呂 宋島弧系統,台灣位在這兩島弧系統交接處,形成台灣島複雜的構造 系統。由於這兩板塊的碰撞與隱沒,台灣地區之地層承受著大地應力, 使得地層變形進而斷裂錯動引發地震,造成台灣地震相當頻繁。根據 中央氣象局紀錄,台灣平均每年有感地震為531 起,屬於世界上有感 地震最頻繁地區之一,而西元 1900 年至今,台灣發生芮氏規模≧6 的地震約有80 個,且西元1973 年以後,平均台灣每年約發生1.6 個  $6 \leq M_L \leq 7$ 的地震(如圖 1.1),造成了不同程度的災害。

歷史上,台灣的災害性地震頻傳,1906 年梅山地震、1935 年新 竹-臺中地震、1941 年中埔地震、1946 年新化地震、1964 年白河地 震、1986 年花蓮地震、1998 年瑞里地震及 1999 年集集大地震皆造成 人民生命財產重大損失(如表 1) (鄭世楠等,1999),經濟損失難以估 計。而這些災害性地震多半發生在台灣西部,台灣西部平原為人口主 要聚集地,也是農業、工業等經濟發展的重要地區,大部分的建築結 構物集中在地質較鬆軟的平原、盆地上,地震災害的威脅相對提高許 多,一旦發生災害就可能會造成許多生命及財產著損失。

地震造成災害的原因,除了地面震動、地盤破壞(如土壤液化、 山崩、地滑等)之外,斷層錯動導致近地表岩土層變形進而造成地形 地貌改變,也是主要的致災原因之一,如斷層帶上之建築物、橋梁或

阻擋覆土壓力的擋土牆等可能發生位移、傾斜或斷裂等現象,亦對於 埋至在地層中的結構物、維生管線造成程度不一的影響。因此,了解 斷層帶的位置和範圍甚為重要!

#### 1.2 研究動機與目的

斷層的形成及活動是受控於斷層兩側岩石的相對位移。隨著地殼 運動所產生張力或壓力在岩石內部累積,當岩石內部所累積的大地應 力超過岩石強度後,就會發生破裂變形,並常伴隨振動將累積的能量 釋放,造成地震。當斷層克服了摩擦力產生滑動時,應力瞬間下降, 會因動力不穩定而造成非常快速的滑動,在不穩定期後會伴隨一段較 長時間的非滑動時期,此時期應力又逐漸累積,當再度克服摩擦力時, 斷層會再次產生滑動,因此斷層滑動是斷續而反覆出現的,而地震通 常在已存在的斷層上反覆發生(Brace and Byerlee, 1966; Scholz, 1990)。 Wells and Coppersmith (1994)由地震機制、地震規模大小與斷層破裂 參數統計迴歸分析後發現,地震規模與地震斷層或活動斷層之破裂長 度、位移的關係相當密切。

近年來根據世界上幾個著名災害性地震之調查結果,顯示於近斷 層跡的結構物受地震造成之災害原因,除了受到強地動之慣性力作用 外,另一導致破壞的主要影響因素即為斷層活動所導致之地層相對位 移變形與伴隨的地表破裂跡發展(Bray, 2001),如 1999 年台灣 921 集 集大地震(Mw=7.6)與 1999 年土耳其 Duzce 地震(Mw=7.2)。921 集集 大地震後,在車籠埔斷層沿線發現長達 90 多公里之地表破裂跡,沿 著地表破裂跡,可以看到因斷層活動或地面不等量抬升而導致的結構 物損壞(如照片 1.1、1.2 所示)、壩體破壞(如台中市石岡壩)、橋梁斷 裂(如台中市埤豐橋)、或地下管線、輸水隧道斷裂。在土耳其的 Duzce

地震亦可發現在斷層活動所致之地表破裂跡沿線大多數結構物均遭 受嚴重所毀。

台灣有許多斷層長久以來因沉積物覆蓋或因人為開發所影響,地 表的斷層露頭已經不易找尋,更遑論用地表斷層露頭找出斷層跡。然 而,從歷史災害地震地表破裂調查結果顯示,若能確定地表斷層跡且 能得知斷層長度,除了能夠避免將來開發時遭遇斷層通過問題,並可 由地震規模與斷層長度的經驗關係,預測未來可能發生的最大地震規 模,對於往後各類建築物的設計及相關地震防災措施來說,都是一項 非常重要的參考因素。

然而,過去百年來,除了 1906 年梅山地震、1935 年新竹-台中地 震及 1999 年集集大地震外,多數災害性地震並未在地表產生明顯斷 層破裂跡,換言之,除了可在地表辨識之活動斷層外,尚有許多發震 構造是隱藏在地底深處,以盲斷層之形態存在,甲仙地震即為此例。 由於盲斷層不易辨識,容易低估地震危害程度,因此,盲斷層活動所 引發之大地震往往因出乎意料而帶來更大威脅,如 1994 年美國洛杉 磯 Mw=6.7 的北嶺地震(Northridge earthquake)。而甲仙地震後雖未發 現地表出露斷層跡,但由野外地表地質調查發現,於高雄市美濃地區 附近觀察到一些地表裂隙,本研究希望藉由探討這些地表裂隙與斷層 錯動所造成之近地表變形是否相關,假使相關,即可進一步推估觸發 斷層投影至地表的位置與斷層尖端距地表深度,以提供此地區未來地 震防災相關資訊。

表 1.1 臺灣災害地震概況 (修改自鄭世楠等, 1999)

地震 名稱	發生時 間(年/ 月/日)	震央(經度/ 緯度)	震源 深度 (km)	規模 (M <sub>L</sub> )	人口死傷/ 房屋損毀	地質現象與災害
斗六 地震	1904/ 11/06	北港溪下游 (120.3/23.5)	7	6.1	145 死 158 傷/3840 棟	新港附近發生地裂與噴砂
梅山地震	1906/ 03/17	嘉義縣民雄 (120.5/23.6)	6	7.1	1258 死 2385 傷 /20987 棟	民雄至大連坑一帶發現斷層,長13 公里,三疊溪至埠仔頭、中洋仔庄至 番婆一帶發生龜裂。龜裂帶多噴砂、 噴泥及噴水現象。
南投 地震	1916/ 08/28	濁水溪上游 (120.9/23.7)	45	6.8	16 死 159 傷/5499 棟	埔里至阿里山多處山崩、埋沒14户
新竹 台 中 地震	1935/ 04/21	苗栗縣關刀 山 (120.8/24.3)	5	7.1	3276 死 12053 傷 /54688 棟	新竹臺中烈震,伴生獅潭、屯子腳斷 層。新竹苗栗地區地裂,大關刀山山 崩,中港溪流域噴土沙,地下水噴 出,地鳴。
中埔 地震	1941/ 12/17	嘉義中埔附 近 (120.5/23.4)	12	7.1	358 死 733 傷/15606 棟	嘉義地方烈震。並造成草嶺山崩,形 成震生湖清水潭。
新化 地震	1946/ 12/05	台南新化附 近 (120.2/23.1)	5	6.1	74 死 482 傷/4038 棟	伴生新化斷層,自那拔林延伸鹽行, 長12公里。地裂、噴水、噴泥、井 水變位、電桿與鐵路歪斜等現象
花東縱谷山	1951/ 10/22	花蓮東南東 15 公里 (121.7/23.8)	4	7.3	68 死 856 傷/2382 棟	米崙斷層再度活動,自花蓮港延伸至 壽豐東北附近。多處地點山崩、玉里 地區地裂,玉里、壽豐等地發生噴 水,多處地區聽到地鳴,並有鐵路彎 曲下沉的現象。
<b>地展</b> 系列	1951/ 11/25	台東北方 30 公里 (120.9/23.0)	36	7.3	17 死/326 傷/1598 棟	伴生玉里地震斷層,自瑞穗北方延伸 至富里以南,全長約43公里。地裂、 山崩、噴水、地鳴、發光等現象。
恆春 地震	1959/ 08/15	恆春 (121.3/21.8)	20	7.1	17 死 68 傷 /2589 棟	恆春半島多處地裂,滿洲鄉發生山 崩。
白河 地震	1964/ 01/18	臺南東北東 43 公里 (120.6/23.2)	18	6.3	106 死 650 傷/36320 棟	嘉南烈震,有地裂、噴砂。
花蓮 地震	1986/ 11/15	花蓮東偏南 10 公里 (121.8/23.9)	15	6.8	13 死 45 傷 /75 棟	蘇花及橫貫公路全線中斷,北迴鐵路 鐵軌扭曲。中和華陽市場 2/3 房屋倒 塌。

瑞里 地震	1998/ 07/17	阿里山西方 14.5 公里 (120.7/23.5)	5	6.2	5 死 27 傷	地震伴隨山崩、邊坡及建築物破壞
集集地震	1999/ 09/21	南投集集鎮 (120.8/23.8)	8	7.3	2415 死 29 失蹤 11305 傷 /51711 棟	台灣全島均感受到嚴重搖晃,造成許 多交通設施、水利設施、電力設備、 維生管線、學校醫院等嚴重損害。引 發大規模山崩與土壤液化現象。為臺 灣災後傷亡最慘重的天災。



圖 1.1 臺灣地區自西元 1900 年以來芮氏規模大於 6 的災害的震央分 布。(葉永田等人, 2011)



(a)北側房屋,斷層跡從屋後繞過(b)南側房屋,斷層跡造成房屋傾斜
 照片1.1(a)、1.1(b) 臺中豐原中正公園附近之車籠埔斷層近地表變
 形(劉桓吉攝)



照片 1.2 臺中豐原中正公園九二一地震地表變形帶中的構造,A、B 圖皆向西邊拍攝。A.旱溪南岸柏油路上數道開張的裂縫。B.旱溪南岸 堤防為高角度斷層錯動的現象,斷層的東側遭抬升約 20 公分 (摘自 活動斷層近地表變形特性研究報告書)

### 第二章 文獻回顧

台灣位處歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊交界處,以致台灣地區之 地層承受著大地應力,造成能量累積,當地層中應力累積到無法承受 時,即會產生破裂錯動,並伴隨振動將累積的能量釋放,引發地震, 因此台灣地震相當頻繁。當地震發生時,所造成的災害原因,除了地 面震動、地盤破壞外,其所引致的地表變形造成地貌上的改變亦是主 要致災原因之一,目前已有許多研究透過數值模擬與物理模型探討斷 層活動所造成上覆鬆軟沉積物之變形行為與變形範圍。而甲仙地震震 央位置位於高雄市六龜區附近,其主要造成災害地區是在台南及高雄, 地質分區上屬於西部麓山帶與濱海平原區,其人口稠密,且上覆沉積 物多為鬆軟之現代沖積層,因此這類地質環境在斷層活動時,常伴隨 大幅度地表變形,容易造成斷層帶上建築物嚴重損毀及生命財產重大 傷亡。

甲仙地震主震發生位置是台灣西南部地震活動度相對較少的區 域,其是由過去尚未發現的盲斷層所引起,儘管未在地表產生明顯的 地表破裂帶,但能透過本地震之震源機制解、餘震分佈及 GPS 等相 關研究,更加了解台灣西南部的斷層構造型態,以下將簡單介紹前人 對甲仙地震之斷層面位態、滑移量的推測結果及與旗山轉型斷層帶 (Chishan Transfer Fault Zone, ChiTFZ)之關係。此外,綜觀全球災害性 地震中,可發現有多起災害性地震是由盲斷層活動所引起,且並不一 定具有明顯的地表破裂帶,這說明了要從明顯的地表破裂帶去推測盲 斷層位置具有困難性,但仍可透過其他方法瞭解斷層造成之變形帶與 變形行為,如探討地表應變量大小變化,本章最後將以西元 1994 年 美國洛杉磯的北嶺地震(Northridge earthquake)做簡單介紹。

#### 2.1 2010 年甲仙地震

西元 2010 年 3 月 4 日上午 8 點 18 分,高雄甲仙地震站東南方 17 公里處發生一起芮氏規模 6.4 之地震,震源深度推估為 22.6 公里, 之後引發一連串餘震發生在主震附近。主震在嘉義、台南及部分台東 地區地震震度達到 5 級以上,特別是在台南楠西與嘉義大埔地區震度 更達到了 6 級,主震震央位置與其地震震度分布圖如圖 1.2。此地震 為台灣西南部近年來最大規模的地震之一,主震發生的位置是在台灣 西南部相對地震活動度較少的區域。本地震於嘉義、台南和高雄地區 造成了一些災害,以台南和高雄地區災害較為嚴重,主要災害包括了 地表裂縫破壞、建築物損毀或倒塌、橋梁損毀、土壤液化及高鐵出軌。

甲仙地震造成近百棟建築物受到損毀(如照片 2.1~2.4),受損的建 築物以民宅和校舍為主,而校舍以中小學居多,其中又以台南市玉井 區的玉井國中受損最為嚴重。在交通方面,於高雄市高美大橋造成橋 面 15 公分落差導致封鎖,臺鐵曾文溪橋之橋面錯移,迫使列車採取 低速慢行,南北向諸多班車誤點,並使臺灣高鐵行駛中共有七個班次 停駛,其中一列班車有輕微出軌,滑行約 2.7 公里後即停止,並無造 成人員傷亡,之後台中以南停駛,全線營運皆受影響。另外,此地震 也引起了 5 起火災,共有 96 人受傷,並在全台灣造成 54 萬 5066 戶 停電,且高雄市美濃區、旗山區和鳳山區,因停電而使交換機無法順 利運作,造成斷訊。雖有許多災情發生,但因地震發生時,大部分的 人已經出門上班、上課,加上災情並不嚴重,故未造成嚴重的傷亡。

除了上述的災害外,在台南市新化區北勢里、太平里、東榮里及 山腳里五甲勢倒厝溪有多起土壤液化現象(照片 2.5、2.6)。此地區於 西元 1946 年的新化地震在也曾發生過嚴重的土壤液化現象。另外, 經濟部地質調查所在附近地區做地表地質調查,於虎頭埤水庫壩頂週

遭有觀察到數道寬約數公分的裂縫,也在高雄市美濃區附近地區觀察 到一些地面破裂現象。

#### 2.1.1 震源機制與餘震分佈之推估斷層面位態

根據中央氣象局測報,甲仙地震為台灣南部一起芮氏規模 6.4 的 地震,震央位在北緯 22.97 度、東經 120.71 度(高雄市甲仙地震站東 南方約 17 公里),即是在高雄市茂林區與桃源區交界附近的山區,震 源深度為 5 公里,其後修正為 22.64 公里。主震發生後二天內,約有 300 多起餘震發生,最大餘震規模達到芮氏規模 5.7,且五天內餘震 分布主要發生在主震之西側,大致呈西北——東南方向分佈。

國震中心之 2010 年 0304 高雄甲仙地震事件勘災報告中提到,由 震源機制解可以說明地震震源之破裂面型態和破裂機制等,協助了解 發震區域之大地應力方向(國家地震防災中心,2010)。本研究將中央 氣象局地震觀測網(Central Weather Bureau Seismic Network, CWBSN)、 中研院寬頻地震網(Broadband Array in Taiwan for Seismology, BATS)、 美國地質調查所(US Geological Survey, USGS)等單位計算甲仙地震之 震源機制解結果如表 2.1 及圖 2.2,儘管角度有些差別,但皆顯示一 略帶走向滑移分量之逆斷層機制。以中央氣象局震源機制解為例,一 組斷層面解為西北——東南走向朝東北傾之破裂面;另一組解為接近正 南北走向朝西之破裂面。雖然第二組斷層面解與台灣主要構造線方向 較相符,但高角度朝西傾破裂面並不符合台灣西部主要應力與構造型 態,且餘震分佈西北——東南走向,如圖 2.3、2.4;因此,推測應為西 北——東南走向,傾向東北方向低角度下傾之逆衝斷層破裂機制,並帶 有部分左移分量。此外,國震中心也引用 BATS 資料庫中附近區域歷 史地震之震源機制做比較,如圖 2.5,於震央西側之歷史地震震源機

制與此次地震相類似,顯示本地震震源特性與此區域過去大地應力一致,即表示此區域屬特殊的東北—西南向為最大應力軸方向,造成本 地震呈西北—東南走向之逆衝斷層型態。

另外,在經濟部地質調查所之甲仙地震報告中也提到甲仙地震是 由一條西北—東南走向、向西南逆衝的盲斷層所引起。而在地震後於 高雄市美濃區、內門區及台南市左鎮區觀察到有地表破裂現象,因此 地質調查所於這三個區域內進行地表破裂與地變現象之調查。

因甲仙地震主震震源機制解由不同單位計算出結果有些許不同 (如表 2.1 及圖 2.2),因此 Huang et al. (2011)結合了中央氣象局地震 觀測網和台灣強地動觀測網所測得的資料重新定位甲仙地震主震之 震源機制解,推測震源深度為 23 公里,並從餘震分佈位置及震源機 制解兩個面中推斷可能的斷層面為走向為 313°,傾角為 41°。Hwang et al. (2012)則利用遠震 P 波反演方法推導甲仙地震之震源參數,其 結果顯示震源深度為 22 公里,斷層面走向為 304°,傾角為 28°,地 震矩為2×10<sup>18</sup> Nm,相當於 M<sub>W</sub>=6.2。

#### 2.1.2 推估甲仙地震之滑移量與斷層面位置

Peltzer(1998)文章中提到從 GPS 測得之表面位移資料通常可以作 為研究斷層破裂過程的邊界條件。Ching et al. (2011)使用台灣南部 139個 GPS 連續測站紀錄到甲仙地震期間之同震位移資料,利用彈性 均勻應力降反演斷層破裂模型及斷層滑移幾何分佈,從 GPS 觀測到 水平位移呈扇形放射狀朝西北方、西方及西南方向遞減,如圖 2.6; 模型反演結果顯示當斷層走向為 318°~344°,斷層傾角為 26°~41°向 東傾時,皆可獲得良好的結果,是一條具有逆衝左移性質之斷層,其 斷層面投影至地表位置如圖 2.6°作者在使用均勻應力降進行反演時,

是將斷層假設為長 50 公里、寬 40 公里,再將其細分成 5 公里×5 公 里大小的 80 個方塊去進行計算反演,其結果顯示最大同震滑移約集 中在半徑 10 公里內,且深度介在 10 公里至 24 公里間,最大滑移量 為 19 公分。

Hsu et al. (2011)利用中研院寬頻地震網(Broadband Array in Taiwan for Seismology, BATS)、全球地震矩張量(Global Centroid Moment Tensor, GCMT)、美國地質調查所地震資訊中心(National Earthquake Information Center, NEIC)之震源機制解及初始P波極性來 估計斷層幾何。其使用彈性半空間錯移模型,設定長為50公里、寬為 62公里的模型,斷層傾角為40°~70°,斷層面從地表向下延伸40公里, 分成64小塊。另外,從台灣GPS連續觀測網可知甲仙地震時同震位移 的方向,因此限制滑移方向與GPS觀測到之地表同震位移方向相同, 計算不同位置之同震滑移,再加上餘震分佈進而逆推斷層面之位態。 經計算後,提出斷層模型之走向為324°,傾角為40°,且逆移分量為 0.05~0.1m,左移分量為0.04m,而最大滑移量則是發生在震源西側深 度約15~20公里,最大滑移量為12公分,如圖2.7。

Lee et al. (2012) 結合了遠震體波、GPS同震位移以及進場強地動 資料進行聯合震源逆推分析,其採用的斷層模型長48公里、寬42公里, 並將其切成3公里×3公里的方塊進行運算,而使用之斷層位態是Hsu et al. (2011) 所提出之走向為324°,傾角為40°。逆推所得到的錯動量 分佈與斷層面投影至地表位置如圖2.8,從圖中看到滑移主要集中在 兩個區域,造成斷層面上分成兩個主要錯動區,較淺部的錯動區平均 滑移約為0.2公尺,而較深部的錯動區平均滑移可達0.3公尺。另外, 作者將聯合震源逆推所得的錯移量及其分佈位置套疊至Ching et al (2011)提出的甲仙地震概念構造模型,結果相當符合,如圖2.9。

從上述可知,前人使用之斷層模型,斷層長約48~50公里,斷層 寬度約40~60公里間,而斷層走向約為310°~330°,斷層傾角約為 28°~41°,而模擬所推得的最大滑移量則有較大落差,Lee et al. (2012) 認為最大滑移量可達30公分,Hsu et al. (2011)則認為最大滑移量只 有12公分。統整如表2。

#### 2.1.3 其他相關研究

由於甲仙地震震央附近有許多條活動斷層,包含了潮州斷層、旗 山斷層、新化斷層、左鎮斷層、觸口斷層等。King et al. (1994) 證明 了當庫倫應力大於0時,會激發斷層破裂;而當庫倫應力小於0時,則 會抑制斷層破裂,因此我們可以從庫倫應力的改變能推測斷層是否有 機會再活動。Hsu et al. (2011) 將潮州斷層、旗山斷層、新化斷層、 觸口斷層分別劃分成幾個小區塊,利用甲仙地震的同震滑移分佈計算 這些斷層的庫倫應力改變狀況,發現在潮州斷層北段較淺部的地方有 明顯的庫倫應力下降情形,在旗山斷層與觸口斷層則有明顯的庫倫應 力增加情形。Ching et al. (2011) 也計算鄰近斷層庫倫應力改變狀況, 結果顯示觸口斷層、木屐寮—六甲斷層、旗山斷層有庫倫應力增加情 形,新化斷層和潮州斷層北部有庫倫應力下降情形,與Hsu et al. (2011) 結果相符。而Lee et al. (2012)文章中也提到甲仙斷層之破裂過程以中 大型規模地震的角度來看是相對較複雜的,破裂過程可能受到鄰近南 正有不同的滑移行為,意味著甲仙地震的破裂過程可能受到鄰近南

#### 2.2 甲仙地震與旗山轉換斷層帶(Chishan Transfer Fault

Zone, CTFZ)

Deffontaines et al(1994)利用全台地質圖、數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)、水系型態、航空照片、遙測影像 (Remotely-sensed Image)等多來源(multisource)及多尺度(multiscale)之 研究方法歸納發現在西部麓山帶存在走向為 NW—SE 的斜向構造, 再加上比對地震與大地測量資料,認為 NW—SE 之斜向構造其主要 構造型態為左移的轉換斷層帶。台灣西部麓山帶可能有四處的主要轉 換斷層帶,由北而南依序為三義轉換斷層帶(Sanyi Transfer Fault Zone, STFZ)、八卦轉換斷層帶(Pakua Transfer Fault Zone, PTFZ)、觸口轉換 斷層帶(Chukou Transfer Fault Zone, ChuTFZ)以及旗山轉換斷層帶 (Chishan Transfer Fault Zone, ChuTFZ)以及旗山轉換斷層帶 (Chishan Transfer Fault Zone, ChiTFZ),如圖 2.10,反應了台灣南北不 等量之變形。其中旗山轉換斷層帶顯示高地震活動,地震的分佈及震 源機制解證實是沿 N140°左移運動,且在斷層帶兩側之背斜軸方向同 樣也支持旗山轉換帶是沿 N130°~140°的左移轉型斷層帶。據野外調 查,旗山轉換斷層帶長超過 20 公里,寬約 1 公里(Deffontaines et al, 1997)。

儘管前人研究已經提出了有左移的轉換斷層帶存在,且認為是具 有一定的地震活動度,然而對於評估這些轉換斷層帶之地震潛力仍然 是相當困難的。而甲仙地震震源機制解所推斷斷層面為西北——東南走 向,Ching et al. (2011)認為與在西部麓山帶中西北——東南走向的旗山 轉換斷層帶(CTFZ)一致,為旗山轉換斷層帶(CTFZ)之延伸,如圖 2.11。 由於過去並沒有明確的證據證明旗山轉換斷層帶(CTFZ)的活動性,加 上背景地震相對稀少,所以作者認為甲仙地震證明了旗山轉換斷層帶 (CTFZ)的活動性,並且提供研究此區域斷層幾何學的研究。

再者,因甲仙地震之斷層走向與台灣造山帶方向,即北北東—南 南西方向,相差約70~90度, Rau et al. (2011)利用了過去近二十年台

灣西南部的歷史地震之震源機制解分析這區域其最大主應力方向,發現到在本地震震源附近區域最大壓應力方向為東北—西南或東北 東—西南西,如圖 2.12。此結果符合了旗山轉換帶的形成條件及 Ching et al. (2011)所提出的。

而 Lee et al. (2012) 利用聯合震源逆推結果與 Ching et al. (2011) 推論同樣相符合,其推算破裂是地下深度 20 公里深的地方隨後朝淺 部傳播,並且可從斷層面上分成幾個錯動區,而這些錯動區投影至地 表後與附近已知之活動斷層有相當的關連性,如圖 2.8,此現象意味 著甲仙地震的破裂過程可能受周遭南北向的斷層系統有所影響,而這 些斷層形成了旗山轉換斷層帶(CTFZ)上的不連續構造,並造成甲仙地 震的破裂過程較為複雜且有不連續的破裂分佈及滑移特性,如圖 2.9。

#### 2.3 災害性地震—以1994年美國洛杉磯北嶺地震

#### (Northridge earthquake)為例

洛杉磯北嶺地震發生於西元 1994 年 1 月 17 日,震央位在北緯 34.21 度,西經 118.53 度,震源深度約 14 公里,芮氏規模為 6.6。根 據主震斷層面解及餘震分布情形,推斷北嶺地震屬逆衝斷層,斷層走 向約為北偏西 80°,斷層面向南傾斜 45°,此為一未知盲斷層。

Cruikshank et al. (1996) 文章中探討了北嶺地震時在洛杉磯的 Winnetka 地區的地表應變大小,作者認為有一東北—西南向的變形帶, 從西南邊的 Canoga Park 穿過 Winnetka 地區至東北邊的北嶺地區 (Northridge),此變形帶長約 4.5 公里,寬約 1 公里,如圖 2.13。這個 變形帶是因地震後,至現地調查記錄震後觀察到在人行道、街道上的

地表破裂及建築物受損情形,並透過量測街道交叉路口的紀念碑或遺 址之長度與角度變化及街道現在長度與過去長度的變化情形,去推斷 其地表上的應變量大小,結果顯示在不同的人行道、街道或一些地表 有擴張和壓縮的現象。從量測結果發現到在變形帶的北側為擴張,南 側為縮短,作者認為這變形帶並非由走向滑移斷層造成,而是由逆衝 斷層所引起的。一般來說,地表應變量越大,其在地表造成的損害, 像是街道或人造結構物的損害程度會越大,而街道的長度也與應變量 大小有些關聯,假使街道長度小於 100 公尺,應變量較容易達到 $10^{-3}$ 以上而產生破壞,若街道長度大於 100 公尺,長度因素就較不影響應 變量大小,如圖 2.14。在 Winnetka 地區的人行道、街道及建築物並 沒有嚴重的受損,但可以在人行道、街道、土壤中等可以看到地表裂 隙,其地表裂隙開口可從 0.5 至 3 公分,如圖 2.15,其應變量約為  $3 \times 10^{-4}$ ,有些受損較嚴重的區域應變量可達到 $10^{-3}$ 。

此外, Tada et al.(1985)提出剪應變與斷層長度之關係式, 如下

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{1 - v} \left( \frac{u_{\text{max}}}{a} \right) \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \left( \frac{a}{x} \right)^2}} - 1 \right)$$
(1)

其中, u<sub>max</sub>為最大滑移量, a 為斷層長度的一半, x 為斷層向地表延伸 至地下多少深度, v 為泊松比, Cruikshank 等人(1996)利用簡化此式 來計算地表應變, 公式為

$$\varepsilon \approx \frac{u_{\max}}{a} f\left(d / a\right) \tag{2}$$

其中,f(d/a)為斷層深度因子,d斷層尖端距地表深度,計算結果 如表 2.3。故可知假使當 $u_{max}/a = 10^{-3}$ ,且盲斷層之斷層尖端距地表 深度除以斷層長度為 0.5 時(即d/2a = 0.5),可得地表應變量為  $3 \times 10^{-4}$ 。因此在 Winnetka 地區現地量測到的應變量大小與利用上式 推算盲斷層距地表深度2公里且滑移量為1公尺所造成的地表應變量, 在地表 100 公尺到 500 公尺範圍內之地表應變量相符合。

而 Johnson et al. (1996) 同樣探討在北嶺地震後加州的 Granada Hills 地區之地表應變量大小, Granada Hills 地區在 Northridge 的北方 約6公里,即上述提到的變形帶之東北方,且位於主要造成北嶺地震 之斷層的上盤。相較於 Winnetka 地區, Granada Hills 地區人行道及 街道出現地表嚴重破裂,建築物損壞,其應變量大小約為3×10<sup>-3</sup>,最 大應變量可達10<sup>-2</sup>。

綜合上述可知,斷層若要在地表造成破壞,與斷層尖端距地表深度、斷層長度及斷層滑移量有相當大的關係。當地表之應變量值達到 10<sup>-3</sup>,即會造成地表出現明顯破壞;假使地表出現的破壞與裂隙不明 顯,應變值約在10<sup>-4</sup>即有可能會出現,而小於10<sup>-4</sup>則不可能會出現地 表破裂情形。
計算單位	走向(strike)	傾角(dip)	滑移角 (rake)
中央氯象局(CWB)	287°	35°	14°
	186°	82°	125°
中研院地球科學所寬頻地	318°	41°	68°
震網(BATS)	167°	52°	109°
美國地質調查所(USGS)	321°	41°	57°
	182°	56°	116°
哈佛大學	313°	29°	41°
(Harvard University)	185°	71°	113°
Huang et al. (2011)	313°	41°	42°
	188°	64°	122°
Hwang et al. (2012)	304°	28°	48°
11wang et al. (2012)	170°	70°	110°

表 2.1 甲仙地震各單位震源機制解彙整 (修改自國震中心)

表 2.2 前人研究之斷層模型比較

作者	斷層位態(strike/dip/rake)	斷層模 型長/ 寬(km)	最大滑移量 (m)
Ching et al. (2011)	318°~344°/26°~41°/40.29°±1.8°	50/40	0.19
Hsu et al. (2011)	324°/40°/未標示	50/62	0.12
Lee et al. (2012)	324°/39°/未標示	42/48	0.3

Relative Depth (d/2a)	Fault depth factor <i>f</i> ( <i>d</i> / <i>a</i> )
0.5	0.31
0.05	2.80
0.005	12.20
0.0005	43.00

表 2.3 斷層深度因子與相對深度對應關係(Cruikshank et al., 1996)



圖 2.1 中央氣象局 20100304 甲仙地震地震報告。(摘自中央氣象局)



圖 2.2 甲仙地震不同單位所計算之震源機制解。



圖 2.3 甲仙地震震後五天內之餘震分布,星形為主震位置,紅線為 附近斷層位置。(引自國震中心)



圖 2.4 甲仙地震主震與幾個較大餘震震源機制解。(引自國震中心)



圖 2.5 甲仙地震震央附近區域歷史地震震源機制解。(引自國震中心)



圖 2.6 GPS 觀測之同震水平位移。白色星點為甲仙地震震央,箭頭為同震位移方向與大小,灰色橢圓為誤差橢圓,其皆在 95%信賴區間內,下方長方形為模擬的斷層面投影至地表及滑移量分布。(Ching et al., 2011)



圖 2.7 甲仙地震推估理想之斷層幾何與同震滑移。藍色箭頭表示滑 移斜度,滑移量則以色帶表示,白色星形為震央,綠色小點為餘震。 (Hsu et al., 2011)



圖 2.8 由斷層模型逆推推得之錯動量分佈與餘震分佈的斷層面地表 投影。粉色星型為震央位置,藍色原點為餘震分佈,色帶為滑移量。 (Lee et al., 2012)



圖 2.9 甲仙地震成因構造概念圖及其與聯合震源逆推所得之錯動量 分佈間的關係。(Lee et al., 2012)



圖 2.10 臺灣主要轉換斷層帶分布圖。(Deffontaines et al., 1994)



圖 2.11 旗山轉換斷層帶(CTFZ)與推測斷層投影至地表位置的相對 位置。(Ching et al., 2011)



圖 2.12 台灣西南部近 20 年震源機制解與應力反演結果,甲仙地震 震央附近區域應力場為 E。(Rau et al., 2011)



圖 2.13 1994 年美國洛杉磯北嶺地震推斷 Winnetka 變形帶,圖中黑 色斜長方形即為 Winnetka 變形帶。(Cruikshank et al., 1996)



圖 2.14 街道長度與應變量大小關係圖。(Cruikshank et al., 1996)



圖 2.15 北嶺地震在 Maiden 造成的地表裂隙。(Cruikshank et al., 1996)



照片 2.1 高雄市內門區內門紫竹寺活動中心嚴重損壞 (劉彥求 攝)



照片 2.2 臺南市新化球場旁三層樓建物的一樓柱遭壓垮情形 (摘自高雄甲仙地震事件勘災報告)



照片 2.3 嘉義市短竹里小雅路社區建物相互碰撞導致外牆擠碎情形 (摘自高雄甲仙地震事件勘災報告)



照片 2.4 臺南市玉井國中仁愛樓震後受損破壞狀況 (摘自高雄甲仙 地震事件勘災報告)



照片 2.5 臺南市新化區北勢里土壤液化情形 I (黃富國 攝)





照片 2.6 臺南市新化區北勢里土壤液化情形 II (黃富國 攝)

# 第三章 研究區域與地質概述

甲仙地震發生於高雄市境內,造成災害地區主要為嘉義縣市、台 南市及高雄市,因此本研究的主要區域為台灣西南部,如高雄市美濃 區等,本章將對研究區域內之地形、地質背景及活動斷層做簡單介 紹。

### 3.1 研究區域構造背景

台灣地處歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊碰撞聚合之交界帶上,東 北部由菲律賓海板塊沿琉球海溝向北隱沒至歐亞大陸板塊下,南部則 由屬歐亞大陸板塊一部分之南中國海板塊沿馬尼拉海溝向東隱沒至 菲律賓海板塊下(Teng et al., 1990)。由於弧陸碰撞過程中,猶同推土 機般將增積岩體向上推擠抬升,造成中央山脈、雪山山脈等陸續被抬 升至地表,並於台灣西部與西南部產生一系列褶皺與斷層,形成覆瓦 狀褶皺-逆衝斷層帶(fold-and-thrust belt)。

而台灣南部地體構造恰巧位於成熟的碰撞造山逐漸轉為碰撞初 期再到隱沒作用為主的構造環境的過渡帶(李元希等,2004),在此區 域中部分斷層可能為全新世沉積物所覆蓋,使得盲斷層活動引致潛在 地震之發生機制變得不易瞭解(饒瑞鈞,2002),甲仙地震就發生在此 區域內。

### 3.2 研究區域地形地質概述

### 3.2.1 研究區域地形概況

本研究區域主要是在高雄美濃區,為屏東沖積平原的最北部,由

旗山溪與荖濃溪等沖積形成的。阿里山山脈最南端為本區的北側山脈, 地勢由北向南逐漸降低,山地的脊線呈現開口向南的三角弧形,美濃 地區恰巧位在三角弧形沖積平原。脊梁山脈位在荖濃溪的東側,平均 海拔高於1000公尺。旗山溪的支流美濃溪是流經本區的主要溪流。

### 3.2.2 研究區域地質簡介

因觀察到的地表裂隙多出現於高雄市美濃區的美濃、龍肚及竹子 門等,屬屏東沖積平原的一部分,由旗山溪流域中的支流美濃溪所沖 積而成,因此美濃、龍肚主要為河階堆積物,岩性以砂、泥及礫石為 主,礫石來自沉積岩。地層屬臺地堆積層。

本研究依據中央地質調查所 2012 年出版的美濃地區五萬分之一 地質圖,僅擷取研究區域部分,並繪製一近乎對角之AA'地質剖面圖, 如圖 3.1、3.2。從地質圖與地質剖面圖中可以看到兩條離美濃地區較 近的斷層,分別為內英斷層與廣林斷層,內英斷層屬逆移斷層,呈東 北西南走向,斷層面向東南傾斜(耿文薄,1967),胡植慶等(Hu et al., 2007)利用 1996-1999 年的 GPS 測量結果,內英斷層兩側並沒有明顯 的位移速度差異;廣林斷層約呈北北東走向,可能是向西高角度傾斜 的斷層(中央地質調查所,2012)。由於這兩斷層之斷層走向與斷層面 傾向皆與甲仙地震之震源機制解求得的方向不相符,故可以合理推測 甲仙地震並非由這兩條斷層引起。

研究區域附近的地層除了臺地堆積層外,另外還有六龜礫岩、隘 寮腳層、鹽水坑頁岩、糖恩山砂岩及長枝坑層。依據中央地質調查所 2012 年出版的美濃地區五萬分之一地質圖說明書,在美濃附近水文 地質鑽探結果顯示在此區的沖積層厚度約 70 公尺,底下即為岩盤; 而在龍肚附近主要以泥與少量的砂為主,可能屬主河道所氾濫出的細

粒沉積物(中央地質調查所, 2012)。

### 3.3 鄰近活動斷層

根據經濟部中央地質調查所 2010 出版的活動斷層分布圖(圖 3.3), 台灣西南部的活動斷層有梅山斷層、九芎坑斷層、觸口斷層、木履寮 斷層、六甲斷層、後甲里斷層、新化斷層、左鎮斷層、小崗山斷層、 旗山斷層及潮州斷層。甲仙地震震央位置位在潮州斷層東側,而主震 和餘震震央分布多位於旗山斷層上盤,因此地震發生後,第一時間推 測致震原因可能與潮州斷層或旗山斷層有關。隨著餘震發生頻率下降 後,根據主震震源機制解與餘震的分布資料結果顯示,可能與左鎮斷 層有空間上的相關性,而在左鎮至六龜間存在一個位移向量變化界線, 此界線有部份也與左鎮斷層約略重合,因此也有部分討論認為左鎮斷 層與致震地質構造有關(經濟部中央地質調查所,2010)。另外,此次 地震在台南新化北勢里附近、太平里附近等發生土壤液化噴砂現象, 與西元 1946 年新化地震發生噴砂位置相近,新化地震是由新化斷層 所引起。因此,甲仙地震可能與上述幾個活動斷層有直接或間接的關 係,本節分別對可能與甲仙地震有關的活動斷層特性做簡單敘述,如 下:

▶ 潮州斷層

潮州斷層位在台灣南部的高雄市與屏東縣境內,為一高角度約 呈南北走向,向東傾斜的逆移斷層兼具左移性質(經濟部中央地質調 查所,2009),斷層分佈範圍從高雄寶來向南延伸至枋寮加祿村(林啟 文等,2009),全長約89公里。

潮州斷層沿著中央山脈山麓存在一明顯的線形構造,為中央山脈變質岩區與平原區沉積岩區的重要分界線。前人將潮州斷層分為

雨部分,北段由高雄六龜寶來村向南延伸至屏東縣三地門鄉大律村, 長約28公里,稱為土壟灣斷層(鳥居敬造,1933),在六龜以北,土 壟灣斷層也稱為樟山斷層(詹新甫,1964),斷層北段為階地礫岩層或 沖積扇礫石層所覆蓋,為盲斷層的型式;而南段則稱為潮州斷層, 由大律村向南延伸至枋寮鄉加祿村,長約為61公里,並推測位於中 央山脈與屏東平原的交界處(Tomita,1955;林朝棨,1957;楊貴三, 1986)。斷層南段的屏東縣新埤鄉附近,斷層在近地表處造成沖積扇 礫石層的撓曲現象,且板岩逆衝到礫石層之上,推測潮州斷層在更 新世晚期可能有活動事件發生,被列為第二類活動斷層(經濟部中央 地質調查所,2010)。

▶ 旗山斷層

旗山斷層為一逆移斷層,呈北東走向,由高雄市旗山附近向南 延伸至高雄市仁武附近,長約 30 公里(吉田要,1932;鳥居敬造, 1933;耿文溥,1967;Tsan and Keng, 1968)。本區位於西部麓山帶 的南端,其上下盤岩層分別為烏山層與古亭坑層,上盤出露以砂岩、 泥岩和礫岩為主;下盤出露以泥岩為主,常形成惡地地形,如月世 界,而兩地層岩性差異也反映於地形上,旗山斷層東側為山麓地形, 西側為丘陵地形。

旗山斷層為一個主斷層以及多個分支斷層組成的斷層變形帶, 變形帶寬度約為40-400公尺之間,主斷層的變形帶寬度為9-30公尺。 旗山斷層主斷面擦痕及斷層帶中破裂面上的擦痕,均反應斷層的運 動形式為逆移兼具左移性質。旗山斷層近期的大地測量結果,仍有 明顯的壓縮量,顯現逆移斷層的特性,被列為第一類活動斷層(經濟 部中央地質調查所,2010)。

▶ 左鎮斷層

左鎮斷層為一左移斷層,約呈西北走向,由台南新庄附近向東南 延伸至南化心仔寮附近,長約10公里,呈西北走向(Wang, 1976;中 國石油公司,1989;張徽正等,1998;林啟文等,2000)。斷層線形 最早係由衛星影像所辨認成形,經野外調查發現沿斷層線形位置存在 小型斷層泥帶,但此現象僅侷限於斷層西段。左鎮段層之活動時代在 六雙層沉積後,約更新世晚期。根據GPS測量資料分析結果,左鎮斷 層兩側仍有明顯的水平速度變化量,跨斷層的速度場變化分析結果, 1996~2006年間的運動為逆移形式兼具右移分量,被列為第二類活動 斷層(經濟部中央地質調查所,2010)。

▶ 新化斷層

新化斷層為一右移斷層,呈東北東走向,由台南市新化區那拔里 向西延伸至北勢里,長度約6公里(張麗旭等,1947)。西元 1946年 12月5日發生芮氏規模6.3的新化地震,即為新化斷層活動所造成(林 啟文等,2000;張麗旭等,1947),並於此區域產生土壤液化噴砂現 象。新化斷層沿線的線形與1946年大地震後調查的斷層位置相吻合; 沿線地形特徵也指示過去即活動過多次,除最近的1946年地震外, 保守估計在10,000年內至少有3次古地震事件。由1999~2006年利 用 GPS 所觀測新化斷層的速度場變化顯示,主要為位移走向平行斷 層,並以右移型式為主,被列為第一類活動斷層(經濟部中央地質調 查所,2010)。



圖 3.1 研究區域之地質圖。(修自中央地質調查所之美濃地質圖幅, 2012)





圖 3.3 臺灣活動斷層分布圖。(引自中央地質調查所, 2010)

# 第四章 資料蒐集與研究方法

有關活動斷層近地表變形特性的研究,最早是由幾位美國的地質 師(如:G.K.Gilbert, F.E.Mattes, E.S.Larsen and A.Lawson等)在調查 1906年San Francisco地震的地表破裂跡(rupture)時,發現一極明顯且 無庸致疑的現象,那就是地震斷層錯動後地表的變形在某些情況下是 以脆性斷層或破裂帶的方式呈現,而在某些情況下則以塑性變形帶的 方式呈現(Lawson, 1908; Reid, 1910)。經過了一百年來對不同地震所 產生的變形帶之調查,紀錄顯示一地震地表變形的可能寬度從僅幾公 尺到近半公里寬皆有可能,在這一範圍內通常包含超過一條以上的脆 性斷層(或破裂帶)或塑性變形帶或兩者皆出現,且這樣的寬度變化除 因 地震的不同有別外,也出現在同一次地震的不同地點(例子 如:Landers地震, Johnson et. al, 1994;集集地震, Huang, 2006)。

甲仙地震後,台灣西南部出現許多由地震造成的損害情形,但並 未有明顯的地表破裂跡,僅觀察到一些地面破裂情形,本研究主要目 的是探討在這些由甲仙地震造成的破壞中,是否有斷層錯動所造成之 近地表變形而產生的破壞或破裂情形?故首先須先蒐集所有甲仙地 震造成的地表破壞與前人至現地調查的資料,加以統整且進行分類, 再進一步透過計算地表應變量大小,分析本地震的地震波與觸發斷層 錯動是否有機會造成地表破裂。研究流程如圖 4.1 所示,以下分成三 個部分進行說明:

## 4.1 現地資料收集彙整與分類

本地震所引發之地表破裂多是以點或分散的叢聚分布。震後,經濟部地質調查所、國立中央大學太遙中心張中白及國立中央大學應用

地質研究所黃文正等人至現地進行地表破裂調查,調查區域包含高雄 市美濃區、內門區、台南市新化區及左鎮區等。調查後發現,地表破 壞較密集出現主要是在高雄市美濃區,以分散的叢聚出現;另外,在 台南市新化區的北勢里、太平里及虎頭埤等地區的農田有土壤液化現 象發生。本研究收集所有因本地震而造成破壞的地區及損毀情況,並 統整地震後前人至現地調查資料,將其分成三大類,分別為建築物結 構損壞、土壤液化和地表破裂,其個別分布位置如圖 4.2。建築物結 構損壞包含了一般民宅建築物、校舍、圍牆倒塌、橋梁損毀等,由於 本地震造成之建築物結構物損壞大部分是與地震力、地震波共振效應、 結構物耐震強度、建築物本身結構有較大關聯,且很難單從建築物破 壞地點找出一方向性及推測斷層的位置,故非本研究主要探討對象; 土壤液化現象則與當地地質材料性質有較大的關係,也非本研究主要 探討對象,因此建築物結構損壞與土壤液化在本研究中將不再加以探 討。而在本研究中所指的地表破裂主要是在甲仙地震後,於高雄市美 "濃區觀察到的鋸齒狀開張型裂隙為主,這些地表裂隙主要出現位置大 致上沿著高 140 號縣道(成功路)和台 28 號道路(中華路),延伸範圍 約四至五公里。

一般經由地震波所造成的地表破裂不具有方向性,本研究將前人 至高雄市美濃區觀察到的地表裂隙之方向進行統整歸類,發現這些地 表裂隙具有方向性,且出現地表裂隙的區域分佈可畫成一破壞帶,呈 西北東南向,與斷層面走向一致。此外,由Rau et al(2011)文章中可 知,甲仙地震區域的地震序列其主應力的方向為東北東—西南西,如 圖 2.12,且從應變橢圓圖來看,當受到東北—西南向壓縮力時,會在 產生西北—東南方向之逆斷層,並可能會出現東北—西南向的開張型 裂隙,如圖 4.3。

再者,九二一集集大地震後,許多學者進行了車籠埔斷層沿線地 表斷層跡的調查,進而了解到災害性地震所產生之地震斷層及其所造 成之近地表變形沿著地表斷層跡會有各種不同的變形型式。黃文正等 人(2000)整理大甲溪至頭汴坑溪間車籠埔斷層地近地表變形形貌,如 圖 4.4, 共有九種型式:(a)單一斷層崖, 斷面上有擦痕, 以埤豐橋東 側大甲溪河床之斷層崖為代表;(b)兩道斷層崖,有時出現兩道斷層 崖以大里溪河床之斷層崖為代表;(c)地表撓曲,未見斷層崖出露,出 現兩組張裂縫,一組平行撓曲崖,一組垂直撓曲軸,以中等教師研習 會旁水稻田之伸張裂隙為代表;(d)地表撓曲,並有雁行排列之伸張 裂隙,指示具有左移或右移分量,豐原中正公園一號橋南端的變形即 具左移分量;(e)地表隆升或地壘狀,兩側皆有撓曲崖,以豐原中正公 園為代表;(f)地表出現階梯狀隆升崖及伸張裂隙,以大里溪河床沖積 層之檳榔園為代表;(g)數道不平行之隆升崖;(h)撓曲崖上岩體翻倒, 地表突然隆起加上重力作用,造成撓曲崖上岩體翻倒;(i)僅有一道或 數道平行之隆升崖。從這九種形式中,本研究認為在高雄市美濃區觀 察到的一系列鋸齒狀開張型裂隙可能與地表撓曲,並有雁行排列之裂 隙這種型態較相似,因此本研究將具有方向性的地表裂隙推斷其成因 進行分類後,再針對可能與斷層錯動所造成之近地表變形有關的地表 裂隙做更進一步的探討。分類後的地表裂隙之方向於下一章會有完整 的說明。

# 4.2 強地動資料與應變關係

估算地震引起的瞬間地表應變是在地震分析與設計地下結構物 的關鍵性指標之一(St John and Zarah, 1987; Hashash et al., 2001)。 Paolucci et al. (2009) 也說到由於無法在地震期間實際量測地表應變,

所以一般習慣透過量測地動,如尖峰地動速度(Peak ground velocity, PGV)、尖峰地動加速度(Peak ground acceleration, PGA)或尖峰地動位 移(Peak ground displacement, PGD),來間接估算尖峰地動應變(Peak ground strain, PGS)。而尖峰地動速度(PGV)與尖峰地動應變(PGS)的關 係最早是由 Newmark 在西元 1967 年提出的,其是利用在均質無限介 質條件下的簡單一維波傳方程式得到,公式如下:

$$PGS = PGV / C \tag{3}$$

C一般是指適當的S波傳遞波速;假使距離震央較遠,使用表面波波 速較恰當。但因上式相當簡化,導致其所推算出的尖峰地動應變值 (PGS)存在差異性,影響因素有波速、場址效應(像是側向非均質性土 壤、空間上的不連續等)、波型(如體波、表面波)與其入射角等,使得 真實的尖峰地動應變值(PGS)會不同於上式計算的結果,且在St.John and Zarah (1987)研究結果可知土壤的相對勁度也會影響推估的地表 應變值。目前已有許多研究在探討如何降低影響因素以修正 Newmark 提出的尖峰地動速度(PGV)與尖峰地表應變(PGS)的關係式(如 Zerva, 2003; Trifunac et al., 1996; Spudich et al., 2008; Paolucci and Pitilakis, 2009)。

由上述可知,若使用 Newmark 提出的公式來求取尖峰地動速度 (PGV)與尖峰地動應變(PGS)的關係,需經過一些修正,而從強地動 紀錄的資料估計地表應變方法,Zerva (2003)將其分成使用單一測站 資料判斷和使用多個測站資料判斷兩種方法。所謂的單一測站判斷的 方法是依賴某個測站所記錄的地震資料來做計算估計,這個方法早在 1996 年已被 Trifunac et al.應用在 1994 年美國洛杉磯北嶺地震 (Northridge earthquake)。Trifunac et al. (1996)使用公式(4)來計算地表 尖峰應變,其中 $\bar{V}$ 為地下 30 公尺的 S 波平均波速,A 為經驗調整因

$$PGS_a \sim A \frac{PGV_a}{\overline{V_s}}$$
 (4)

子,一般介在 0.2~1.7 間;因當地所測得之平均 S 波波速皆大於 200m/s, 在計算水平地動應變時,使用  $PGV_a/\overline{V_s}$ ,計算垂直地動應變時,使 用  $PGV_a/1.7v_s$ ;另外,若使用表面波進行計算,其調整因子的範圍也 會不同,以北嶺地區為例,A 最大可達 0.36。而在北嶺地震時於北嶺 地區(Northridge)、Winnetka 地區及 Canoga Park 可以在水泥地、柏油 路等觀察到許多地表破裂,其利用上式計算,結果在北嶺地區水平尖 峰應變大於 $10^{-2.72}$ ,與第二章節所提到的實際野外量測之地表應變值相比, 似乎具有些微放大效果,表示其修正因子仍未完全適用。Scandella and Paolucci(2006)同樣進行公式(3)的修正,其嘗試在橫向不連續介質情 況下進行 PGV 與 PGS 關係之研究,導出的公式如公式(5), $V_s$ 也是地 下 30 公尺的 S 波波速。Spudich et al. (2008)文章中則是將地震波傳遞 方向與水平之夾角加入考慮,並分別對 P 波、S 波和雷利波(Rayleigh wave)之產生的地表最大應變做探討。

$$PGS_{a} = \frac{1-\eta}{1+\eta} \frac{PGV}{V_{s}} \left[ F_{1}\left(x/L,\alpha\right) + F_{2}\left(x/\overline{H},\alpha\right) \right]$$
(5)

而 Paolucci et al. (2009)則是分別探討了尖峰地動速度(PGV)、尖峰地動加速度(PGA)、尖峰地動位移(Peak ground displacement, PGD) 與尖峰地動應變(PGS)的關係,從其結果可知尖峰地動位移(PGD)與 尖峰地動應變(PGS)的相關性明顯低於尖峰地動速度(PGV)、尖峰地 動加速度(PGA)與尖峰地動應變(PGS)的相關性,而尖峰地動速度 (PGV)與尖峰地動應變(PGS)的相關性又高於尖峰地動加速度(PGA) 與尖峰地動應變(PGS)的相關性又高於尖峰地動加速度(PGA) (PGV)與尖峰地動應變(PGS)的關係來推測地震時地表可能會出現之 最大應變值。

到目前為止,對於計算地震波造成的地表應變量,即是利用尖峰 地動速度(PGV)與尖峰地動應變(PGS)的關係,從綜合上述前人研究 結果得知,對於公式(3)的修正公式皆以適用在某次地震或某個區域 的特定情況下,較為合適,且沒有一相對適合使用在不同地區的修正 公式,也未有適用於台灣的修正參數;再者,本研究使用此方法的目 的為討論由震波所造成的地表應變大小是否有機會造成地表發生破 壞或破裂現象?故,儘管我們知道了使用 Newmark 提出的公式來求 取尖峰地動速度(PGV)與尖峰地動應變(PGS)的關係,需再經過一些 修正,但本研究目前仍使用 Newmark 提出的公式,即公式(3)進行初 步估算,以推測震波造成的地表應變量大小。

# 4.3 彈性半空間錯動模型(Elastic half-space dislocation

model)

#### 4.3.1 彈性半空間錯動模型原理

因斷層錯動是發生在地表面以下的岩體中,假設我們將斷層兩側 的岩石視為完整岩體,此時岩石受到斷層錯動導致的變形會近似線性 的彈性關係,這整個變形場的空間即可視為彈性半無限空間(elastic half-space)。當斷層錯動時,將其視為彈性半無限空間中某個面產生 位移,此面是空間中位移不連續的邊界,而探討其與彈性半無限空間 中位移場之關係的模擬,稱之為錯動模型(dislocation model)(邱俊穎, 2007)。故當地下某一斷層面錯動而造成地震時,我們可藉由彈性半 無限空間錯動模型來描述。

在鄰近斷層區域的地表須視為一自由表面,此面以上的位移、應

力、應變均為零,以彈性半無限空間為邊界條件,受力後可利用運動 方程式解出在彈性半無限空間的格林函數。而 Mindlin 早在西元 1936 年就已經完整推導出彈性半無限空間的格林函數,其利用 Volterra 公 式對點源作積分,即可得到一點源的解答, Volterra 公式表示如下:

$$u_{k}(x) = \iint_{\Sigma} \left(\xi\right) \left[ \mu \left(\frac{\partial g_{k}^{i}}{\partial \xi_{j}} + \frac{\partial g_{k}^{j}}{\partial \xi_{i}}\right) + \lambda \delta_{ij} \frac{\partial g_{k}^{m}}{\partial \xi_{m}} \right] n_{j} d\Sigma$$
(6)

其中,

 $u_k(x)$ :表示地表上的位移;

 $s_i(\xi)$ :表示地面下的錯動量;

 $\mu, \lambda$ :為拉梅常數(Lame's constant);

 $g_k^i$ :表示因受i方向的力,造成地表某一點 $(x_1, x_2, x_3)$ 於k方向的位移;  $g_k^m$ :表因受m方向的力,造成地表某一點 $(x_1, x_2, x_3)$ 於k方向的位移;  $n_i$ :為單位面 $d\Sigma$ 上法向量的方向餘弦。

此式用來描述地底下某個面∑的錯動量 $s_i(\xi_1,\xi_2,\xi_3)$ 在地表造成的位移 $u_k(x_1,x_2,x_3)$ 。Okada(1985, 1992)對於在彈性半無限空間中,一 有限矩形斷層錯動所造成地表位移已做了詳盡的整理探討,本研究所 使用之斷層錯動模型即是依循 Okada 定義的斷層幾何與斷層座標系 統(Okada, 1985; 1992),如圖 4.5。Okada 對有限矩形斷層在三種不同 錯動方式下,每單位滑移量於地表所產生的位移量推導如下: (1) strike-slip  $(U_1)$ :

$$u_{x} = -\frac{U_{1}}{2\pi} \left[ \frac{\xi q}{R(R+\eta)} + \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} + I_{1} \sin \delta \right] ||$$
  
$$u_{y} = -\frac{U_{1}}{2\pi} \left[ \frac{\tilde{y}q}{R(R+\eta)} + \frac{q\cos\delta}{R+\eta} + I_{2}\sin\delta \right] ||$$
(7)

$$u_{z} = -\frac{U_{1}}{2\pi} \left[ \frac{\tilde{d}q}{R(R+\eta)} + \frac{q\sin\delta}{R+\eta} + I_{4}\sin\delta \right] \parallel$$

(2) dip-slip  $(U_2)$ :

$$u_{x} = -\frac{U_{2}}{2\pi} \left[ \frac{q}{R} - I_{3} \sin \delta \cos \delta \right] ||$$

$$u_{y} = -\frac{U_{2}}{2\pi} \left[ \frac{\tilde{y}q}{R(R+\xi)} + \cos \delta \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} - I_{1} \sin \delta \cos \delta \right] ||$$

$$u_{z} = -\frac{U_{2}}{2\pi} \left[ \frac{\tilde{d}q}{R(R+\xi)} + \sin \delta \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} - I_{5} \sin \delta \cos \delta \right] ||$$
(8)

(3) tensile fault  $(U_3)$ :

$$u_{x} = -\frac{U_{3}}{2\pi} \left[ \frac{q^{2}}{R(R+\eta)} - I_{3} \sin^{2} \delta \right] \|$$

$$u_{y} = -\frac{U_{3}}{2\pi} \left[ \frac{-\tilde{d}q}{R(R+\xi)} - \sin \delta \left\{ \frac{\xi q}{R(R+\eta)} - \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} \right\} - I_{1} \sin^{2} \delta \right] \| \qquad (9)$$

$$u_{z} = -\frac{U_{3}}{2\pi} \left[ \frac{\tilde{y}q}{R(R+\xi)} + \cos \delta \left\{ \frac{\xi q}{R(R+\eta)} - \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} \right\} - I_{5} \sin^{2} \delta \right] \|$$

其中:

$$I_{1} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[ \frac{-\xi}{\cos \delta \left(R + \tilde{d}\right)} \right] - \frac{\sin \delta}{\cos \delta} I_{5}$$

$$I_{2} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[ -\ln \left(R + \eta\right) \right] - I_{3}$$

$$I_{3} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[ \frac{-\tilde{y}}{\cos \delta \left(R + \tilde{d}\right)} - \ln \left(R + \eta\right) \right] + \frac{\sin \delta}{\cos \delta} I_{4}$$

$$I_{4} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{1}{\cos \delta} \left[ \ln \left(R + \tilde{d}\right) - \sin \delta \ln \left(R + \eta\right) \right]$$

$$I_{5} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{2}{\cos \delta} \tan^{-1} \left[ \frac{\eta \left( X + q \cos \delta \right) + X \left( R + X \right) \sin \delta}{\xi \left( R + X \right) \cos \delta} \right]$$

本研究利用 Okada(1992)提出的一有限矩形斷層錯動造成地表位 移之解法,透過程式進行計算,以求得斷層錯動造成之地表的應變量 與應變型式。於程式中主要輸入的參數有斷層長度 L、斷層寬度 W、 距地表深度 d、斷層走向 $\alpha$ 、斷層傾角 $\delta$ 、錯移量 $(U_1, U_2, U_3)$ 、剪力 模數 G 及泊松比 $\rho$ ,此外,本研究程式中的錯動量 $(U_1, U_2, U_3)$ 分別以 左移、逆斷層及開張為正。

### 4.3.2 参數效應

於程式主要輸入的參數有斷層長度L、斷層寬度W、斷層上部距 地表深度 d、斷層走向α、斷層傾角δ、錯移量(U<sub>1</sub>,U<sub>2</sub>,U<sub>3</sub>)、剪力模 數G及泊松比ρ,其中以斷層傾角δ、斷層上部距地表深度d及滑移 量作為變數,透過這三個參數的變化來探討對地表應變量之影響。

以下分別簡單介紹斷層傾角δ、斷層上部距地表深度 d 及滑移量 對地表應變量的影響。在模擬中,斷層長度設為 50 公里、斷層寬度 設為 40 公里。

### 4.3.2.1 斷層傾角對地表應變量的影響

從前人計算所得之震源機制解、餘震分布及 GPS 同震位移推估 的斷層走向及斷層傾角,本研究將前人研究結果作為參考,設定斷層 傾角角度為 25°~50°,觀察當斷層上部距地表深度及滑移量為固定的 情形下,斷層傾角對地表應變量的影響,結果如表 4.1。

從表 4.1 我們能得知, 在同一深度時, 斷層傾角在 50°與 25°, 斷

層延伸至地表位置應變量並沒有太大的變化,除了深度為 300 公尺時, 斷層傾角 50°與 25°之地表應變量差異較大外,其他深度皆在 5 倍以 內。另外,由圖 4.8 可知斷層傾角為低角度時,靠近斷層延伸至地表 之斷層面垂直投影至地表位置的應變方向有較明顯的轉向,應變量也 相對於高角度的斷層面垂直投影至地表位置之左右兩側較大。

### 4.3.2.2 斷層距地表深度對地表應變量的影響

盲斷層錯動於地表產生破裂或裂隙,代表其斷層面相當接近地表, 本研究將斷層延伸至地表下 500 公尺、300 公尺、100 公尺及 50 公尺 來觀察斷層深度在相同的斷層傾角及滑移量條件下,對地表應變量的 影響,如表 4.2。

從表 4.2 可知, 在相同的斷層傾度時, 無論是 50°或 25°, 斷層距 地表深度 500 公尺到 50 公尺, 可以看到地表應變量有明顯的改變, 約相差了 10 倍。在表 4.1, 也可發現當斷層距地表深度 500 公尺時, 其地表應變量皆未達10<sup>-4</sup>;當斷層延伸至距地表下 100 公尺時, 地表 應變量皆達10<sup>-4</sup>。從以上敘述得知, 斷層延伸至地表下深度對地表應 變量具有相當的影響。

### 4.3.2.3 滑移量大小對地表之應變量的影響

前人利用 GPS 同震位移逆推斷層之滑移量分布,結果如表 2.2, 本研究參考前人計算出的最大滑移量與平均滑移量,探討在斷層傾角、 斷層深度與滑移量對地表的應變量大小之影響。此外,雖前人研究皆 認為此斷層是一條具有逆衝並帶有些微左移性質之斷層,但於本研究 中僅考慮逆移分量,結果如表 4.3。

在表 4.3 可知,無論斷層傾角大小和斷層距地表深度,當斷層傾

角和斷層距地表深度皆相同的條件下,逆移分量為 0.3 公尺到 0.1 公 尺時,有差距但並未太明顯。於相同斷層傾角情況下,當斷層傾角大 於 35°,斷層距地表深度為 300 公尺時,逆移分量 0.3 公尺和逆移分 量 0.1 公尺的地表應變量大小差異相較於其他深度,有較明顯的落差; 而在斷層傾角小於 35°時,斷層距地表深度變為 100 公尺時,逆移分 量 0.3 公尺和逆移分量 0.1 公尺的地表應變量大小差異相較於其他深 度,有較大的落差。因此,逆移分量對地表之應變量影響相較於斷層 距地表深度較小些,但仍具一定的影響力,並與斷層傾角有互相牽引 效果。

綜合上述三個參數對地表應變量的影響,可知這三個參數彼此相 互影響,其中以斷層距地表深度對地表應變量之影響相對較大較明顯, 逆移分量與斷層傾角相對影響較小。

最大斷層	長度 50	km,最大斷層寬度 40km,	逆移分量 0.3 公尺
斷層距地 表下深度 (m)	斷層 傾角	斷層延伸至地表位置之 地表應變量	斷層延伸至地表位置 <u>南側</u> 之地表應變量
	50°	$-8.7 \times 10^{-5} \sim -1.4 \times 10^{-4}$	$-8.7 \times 10^{-5}$
	45°	$-8.1 \times 10^{-5} \sim -1.3 \times 10^{-4}$	$-8.1 \times 10^{-5}$
500	40°	$-7.24 \times 10^{-5} \sim -1.2 \times 10^{-4}$	$-7.24 \times 10^{-5}$
500	35°	$-6.2 \times 10^{-5} \sim -1 \times 10^{-4}$	$-6.2 \times 10^{-5}$
	30°	$-5 \times 10^{-5} \sim -8 \times 10^{-5}$	$-5 \times 10^{-5}$
	25°	$-3.8 \times 10^{-5} \sim -5.9 \times 10^{-5}$	$-3.8 \times 10^{-5}$
	50°	$-1.4 \times 10^{-4} \sim -2.4 \times 10^{-4}$	$-1.4 \times 10^{-4}$
	45°	$-1.3 \times 10^{-4} \sim -2.2 \times 10^{-4}$	$-1.3 \times 10^{-4}$
200	40°	$-1.2 \times 10^{-4} \sim -2 \times 10^{-4}$	$-1.2 \times 10^{-4}$
500	35°	$-1 \times 10^{-4} \sim -1.7 \times 10^{-4}$	$-1 \times 10^{-4}$
	30°	$-8.1 \times 10^{-5} \sim -1.3 \times 10^{-4}$	$-8.1 \times 10^{-5}$
	25°	$-6.1 \times 10^{-5} \sim -1 \times 10^{-4}$	-6.1×10 <sup>-5</sup>
	50°	$-4.2 \times 10^{-4} \sim -7.2 \times 10^{-4}$	$-4.2 \times 10^{-4}$
	45°	$-3.9 \times 10^{-4} \sim -6.7 \times 10^{-4}$	$-3.9 \times 10^{-4}$
100	40°	$-3.5 \times 10^{-4} \sim -6 \times 10^{-4}$	$-3.5 \times 10^{-4}$
100	35°	$-3 \times 10^{-4} \sim -5.1 \times 10^{-4}$	$-3 \times 10^{-4}$
	30°	$-2.4 \times 10^{-4} \sim -4.1 \times 10^{-4}$	$-2.4 \times 10^{-4}$
	25°	$-1.8 \times 10^{-4} \sim -3.1 \times 10^{-4}$	$-1.8 \times 10^{-4}$
	50°	$-8.4 \times 10^{-4} \sim -1.43 \times 10^{-3}$	$-8.4 \times 10^{-4}$
	45°	$-7.8 \times 10^{-4} \sim -1.35 \times 10^{-3}$	$-7.8 \times 10^{-4}$
50	40°	$-6.9 \times 10^{-4} \sim -1.2 \times 10^{-3}$	$-6.9 \times 10^{-4}$
50	35°	$-5.9 \times 10^{-4} \sim -1.03 \times 10^{-3}$	$-5.9 \times 10^{-4}$
	30°	$-4.7 \times 10^{-4} \sim -8.2 \times 10^{-4}$	$-4.7 \times 10^{-4}$
	25°	$-3.5 \times 10^{-4} \sim -6.2 \times 10^{-4}$	$-3.5 \times 10^{-4}$

表 4.1	斷層傾角	$\delta$ 、	斷層距地表深	度 d 與	與地表應	医变量的關係
-------	------	------------	--------	-------	------	--------

最大	、斷層長度 50kn	n,最大斷層寬度 40km,並	色移分量 0.3 公尺
斷層 傾角	斷層距地表 下深度(m)	斷層延伸至地表位置之 地表應變量	斷層延伸至地表位 置 <u>南側</u> 之地表應變 量
	500	$-8.7 \times 10^{-5} \sim -1.4 \times 10^{-4}$	$-8.7 \times 10^{-5}$
50°	300	$-1.4 \times 10^{-4} \sim -2.4 \times 10^{-4}$	$-1.4 \times 10^{-4}$
50	100	$-4.2 \times 10^{-4} \sim -7.2 \times 10^{-4}$	$-4.2 \times 10^{-4}$
	50	$-8.4 \times 10^{-4} \sim -1.43 \times 10^{-3}$	$-8.4 \times 10^{-4}$
	500	$-8.1 \times 10^{-5} \sim -1.3 \times 10^{-4}$	$-8.1 \times 10^{-5}$
150	300	$-1.3 \times 10^{-4} \sim -2.2 \times 10^{-4}$	$-1.3 \times 10^{-4}$
43	100	$-3.9 \times 10^{-4} \sim -6.7 \times 10^{-4}$	$-3.9 \times 10^{-4}$
	50	$-7.8 \times 10^{-4} \sim -1.35 \times 10^{-3}$	$-7.8 \times 10^{-4}$
	500	$-7.24 \times 10^{-5} \sim -1.2 \times 10^{-4}$	$-7.24 \times 10^{-5}$
40°	300	$-1.2 \times 10^{-4} \sim -2 \times 10^{-4}$	$-1.2 \times 10^{-4}$
	100	$-3.5 \times 10^{-4} \sim -6 \times 10^{-4}$	$-3.5 \times 10^{-4}$
	50	$-6.9 \times 10^{-4} \sim -1.2 \times 10^{-3}$	$-6.9 \times 10^{-4}$
	500	$-6.2 \times 10^{-5} \sim -1 \times 10^{-4}$	$-6.2 \times 10^{-5}$
250	300	$-1 \times 10^{-4} \sim -1.7 \times 10^{-4}$	$-1 \times 10^{-4}$
33	100	$-3 \times 10^{-4} \sim -5.1 \times 10^{-4}$	$-3 \times 10^{-4}$
	50	$-5.9 \times 10^{-4} \sim -1.03 \times 10^{-3}$	$-5.9 \times 10^{-4}$
	500	$-5 \times 10^{-5} \sim -8 \times 10^{-5}$	$-5 \times 10^{-5}$
200	300	$-8.1 \times 10^{-5} \sim -1.3 \times 10^{-4}$	$-8.1 \times 10^{-5}$
30	100	$-2.4 \times 10^{-4} \sim -4.1 \times 10^{-4}$	$-2.4 \times 10^{-4}$
	50	$-4.7 \times 10^{-4} \sim -8.2 \times 10^{-4}$	$-4.7 \times 10^{-4}$
	500	$-3.8 \times 10^{-5} \sim -5.9 \times 10^{-5}$	$-3.8 \times 10^{-5}$
750	300	$-6.1 \times 10^{-5} \sim -1 \times 10^{-4}$	$-6.1 \times 10^{-5}$
25	100	$-1.8 \times 10^{-4} \sim -3.1 \times 10^{-4}$	$-1.8 \times 10^{-4}$
	50	$-3.5 \times 10^{-4} \sim -6.2 \times 10^{-4}$	$-3.5 \times 10^{-4}$

表 4.2 斷層距地表深度 d、斷層傾角 $\delta$ 與地表應變量的關係

	最次	大斷層長度 50km	,最大斷層寬度4	0km
<b>燃</b> に尽	斷層距	逆移 0.3 公尺	逆移 0.2 公尺	逆移 0.1 公尺
断僧	地表下	断 僧 延 伸 至 地 表 位 罢 去 側 之	<b>斷層延伸至地</b> 	斷層延伸至地衣
以内	深度(m)	衣位 <u>且</u> 角 <u>肉</u> 之 地表應變量	衣恤 <u>⊥</u> <u>用例</u> ∠ 地表應變量	加 <u>国</u> 角 <u>肉</u> 之地衣 應變量
	500	$-8.7 \times 10^{-5}$	$-5.8 \times 10^{-5}$	$-2.9 \times 10^{-5}$
500	300	$-1.4 \times 10^{-4}$	$-9.6 \times 10^{-5}$	$-4.8 \times 10^{-5}$
50°	100	$-4.2 \times 10^{-4}$	$-2.8 \times 10^{-4}$	$-1.4 \times 10^{-4}$
	50	$-8.4 \times 10^{-4}$	$-5.6 \times 10^{-4}$	$-2.8 \times 10^{-4}$
	500	$-8.1 \times 10^{-5}$	$-5.4 \times 10^{-5}$	$-2.7 \times 10^{-5}$
150	300	$-1.3 \times 10^{-4}$	$-8.9 \times 10^{-5}$	$-4.4 \times 10^{-5}$
43	100	$-3.9 \times 10^{-4}$	$-2.6 \times 10^{-4}$	$-1.3 \times 10^{-4}$
	50	$-7.8 \times 10^{-4}$	$-5.2 \times 10^{-4}$	$-2.6 \times 10^{-4}$
	500	$-7.24 \times 10^{-5}$	$-4.8 \times 10^{-5}$	$-2.4 \times 10^{-5}$
40°	300	$-1.2 \times 10^{-4}$	$-7.9 \times 10^{-5}$	$-4 \times 10^{-5}$
40	100	$-3.5 \times 10^{-4}$	$-2.3 \times 10^{-4}$	$-1.2 \times 10^{-4}$
	50	$-6.9 \times 10^{-4}$	$-4.6 \times 10^{-4}$	$-2.3 \times 10^{-4}$
	500	$-6.2 \times 10^{-5}$	$-4.1 \times 10^{-5}$	$-2.1 \times 10^{-5}$
35°	300	$-1 \times 10^{-4}$	$-6.4 \times 10^{-5}$	$-3.4 \times 10^{-5}$
55	100	$-3 \times 10^{-4}$	$-2 \times 10^{-4}$	$-9.9 \times 10^{-5}$
	50	$-5.9 \times 10^{-4}$	$-3.9 \times 10^{-4}$	$-2 \times 10^{-4}$
	500	$-5 \times 10^{-5}$	$-3.3 \times 10^{-5}$	$-1.7 \times 10^{-5}$
20°	300	$-8.1 \times 10^{-5}$	$-5.4 \times 10^{-5}$	$-2.7 \times 10^{-5}$
30	100	$-2.4 \times 10^{-4}$	$-1.6 \times 10^{-4}$	$-7.9 \times 10^{-5}$
	50	$-4.7 \times 10^{-4}$	$-3.1 \times 10^{-4}$	$-1.6 \times 10^{-4}$
	500	$-3.8 \times 10^{-5}$	$-2.5 \times 10^{-5}$	$-1.3 \times 10^{-5}$
250	300	$-6.1 \times 10^{-5}$	$-4.1 \times 10^{-5}$	$-2.5 \times 10^{-5}$
23	100	$-1.8 \times 10^{-4}$	$-1.2 \times 10^{-4}$	$-5.9 \times 10^{-5}$
	50	$-3.5 \times 10^{-4}$	$-2.4 \times 10^{-4}$	$-1.2 \times 10^{-4}$

表 4.3 消移	重、	斷層傾角	ð`	• 斷層呈	巨地表深度	d	與地表,	態變	重闘	係
----------	----	------	----	-------	-------	---	------	----	----	---



圖 4.1 研究方法流程。


圖 4.2 甲仙地震造成的三大破壞方式分類與位置分布圖。



圖 4.3 應變橢圓示意圖。在東北-西南方向上受到壓應力,且於西北 -東南方向上有張應力,在此情況下,可能會產生西北-東南走向之逆 移斷層,東北-西南走向之正移斷層與開張型裂隙。



圖 4.4 車籠埔斷層地表破裂形貌示意圖。(黃文正等人, 2000)



圖 4.5 修自 Okada(1985)定義的斷層幾何與斷層座標系統。在一均質 半空間的彈性體內存在一長 L,寬 W,深 d 的斷層面;座標系 x 定義 為斷層走向,斷層面的錯動分為與走向平行的 U<sub>1</sub>、與傾角平行的 U<sub>2</sub> 以及垂直斷層面 U<sub>3</sub>,而在自由面以上的應力、應變與位移皆為零。



圖 4.6 初步模擬結果。模擬參數設定為斷層長度 50 公里,斷層寬度 40 公里,斷層傾角 40°,逆移分量為 30 公分,在此條件下,斷層上 部投影至地表的應變量可達10<sup>-4</sup>,黃色方框之局部放大詳見圖 4.7。



圖 4.7 初步模擬結果之圖 4.6 黃色方框局部放大圖。於斷層上部延 伸至地表位置會有最大應變量,且在斷層上部延伸至地表最南側位置 應變方向有明顯的改變。



圖 4.8 模擬斷層長度、寬度、斷層距地表深度與滑移量相同時,斷層傾角 50°與 25°之地表應變量變化。

# 第五章 資料分析與研究結果

## 5.1 地表破裂出現位置與走向性統整

彙整前人現地調查資料結果發現地表破裂主要出現在高雄市美 濃區,除了地表出現裂隙外,亦有許多建築物有受損情形,像是在龍 肚社區及龍東街的建築物,這提供了甲仙地震之觸發斷層重要資訊。 本研究依照地表裂隙出現地點,可將其分成五個地區,分別為高美醫 護管理專科學校、小山社區、文昌宮、龍肚街口與龍肚國中及竹子門, 如圖 5.1。這些地表裂隙由新鮮的風化裂面判斷為甲仙地震後所產生 的,主要出現位置大致上沿著高140號縣道(成功路)和台28號道路(中 華路),延伸範圍約四至五公里,約呈一西北東南走向之破壞帶,與 斷層面及旗山轉型斷層帶方向一致,如圖 5.1。

以下分別針對高美醫護管理專科學校、小山社區、文昌宮、龍肚 街口與龍肚國中及竹子門五個區域所觀察到之地表裂隙進行說明與 分類:

#### 5.1.1 高美醫護管理專科學校

高美醫護管理專科學校位在高 140 號縣道(成功路)上,其校區分 跨在成功路的兩側,從高美醫專分校至主校區地勢上略為抬升,較高 於鄰近處,如照片 5.1.1-1。成功路寬約 11 公尺,地表裂隙沿著高美 醫專分校校區外的成功路北側,即靠近高雄市美濃區市集路段開始出 現,一路向高美醫專本校區方向密集出現,地表裂隙的出現延續約至 縣道 9.5 公里處。所見的裂隙散布在成功路上與路旁,並有幾道裂隙 是向路旁結構物延伸,造成結構物受損,如照片 5.1.1-2;另外於成功 路西側有兩條約 6 公尺寬的柏油小徑之部分路段也有許多裂隙與道 路受損情形出現,受損小徑一號離成功路約100公尺,與成功路平行, 受損小徑二號離成功路約300公尺,與成功路約夾60°,這兩條受損 小徑彼此並沒有相交路段,如圖5.2。

本路段在成功路出現之地表裂隙主要可分為兩組不同的鋸齒狀 開張型裂隙,第一組走向為與成功路垂直或近乎垂直,第二組則與成 功路幾乎平行。第一組地表裂隙於高美醫專分校北側之路段開始出現, 從高美醫專分校門口至北側約100公尺處(即第一個交叉路口)範圍內, 有五道近乎垂直成功路的地表裂隙,皆貫穿成功路,長約 11 公尺, 如圖 5.2 中的 F1~F5,照片 5.1.1-3,這五道地表裂隙走向大約介於 250°~260°之間,最大開裂寬約2公分,平均開裂寬約為1公分。從 北邊數起的第四道地表裂隙,其向東延伸至受到損毀的樓房(即圖 5.2 中的 H1)。高美醫專分校校門口也有兩道與成功路近乎垂直的地表裂 隙, 校門口北側的地表裂隙 F6 長約 13 公尺, 其向西側可追跡至礫石 水泥地道上,如照片5.1.1-4; 校門口南側的地表裂隙 F7 長約 12 公尺, 向西側延伸至成功路旁與稻田銜接的礫石水泥斜坡與水泥護牆,在成 功路與稻田約有一至二公尺的高差,中間有水泥護牆、礫石水泥斜坡 和水溝牆作為隔離,可以從水泥護牆和水溝牆觀察到裂隙,如照片 5.1.1-5; 有些裂隙位置無法直接對比馬路上的裂隙, 如照片 5.1.1-6, 水溝牆上至少有五道明顯的小裂隙,並有部分脫落,研判應是甲仙地 震時造成的。在高美醫專校區南邊的成功路上,有三道走向約為 230°~260°的地表裂隙(即裂隙 F12~F15), F12 不像在北邊的地表裂隙 延伸性較佳,長度約為7公尺,後兩道則與北邊的相似,長度約為 10 公尺,開裂寬平均約5公釐。

在成功路上的第二組地表裂隙為近乎平行道路的,走向約 340°~345°,主要是出現在高美醫專分校門口至高美醫專主校區的斜

坡上,並於道路東西兩側皆有出現,如照片 5.1.1-7。裂隙兩側有明顯 的高低差,特別是在成功路西側所觀察到的地表裂隙。這些地表裂隙 各道是由數道較短的裂隙組成,因出現位置是位於上坡且道路西側下 方為籃球場,加上出現的型態與鄰近馬路上的舊裂隙雷同,也與一般 道路上出現的柏油路疲乏破壞有些許類似,推測成因與地下管線及柏 油路疲乏相關,因此本研究將不再進一步探討此組裂隙。另外,在成 功路東側與水泥的接縫處及鄰近接縫處也可以觀察到零星的開張裂 隙,這與道路結構在接縫處相對脆弱特性相關,故本研究也不將這些 裂隙列為探討的對象。

在成功路西側距離約 100 公尺有一條與其平行的柏油小徑,在小徑上有幾道長約 6 公尺垂直切穿的裂隙,走向約為 245°~255°,分布的範圍與成功路上的地表裂隙位置相當,兩側的水泥溝能看到數處明顯的損害,如照片 5.1.1-8,並有兩棟樓房受到輕微損害(即圖 5.2 中的 H2 和 H3)。儘管此柏油小徑的寬度較成功路短,但因其與成功路上的裂隙似乎具有連續性,故在此將平行的柏油小徑之地表裂隙歸於成功路上第一組的地表裂隙。

而在成功路西側距離約300公尺,與成功路約夾60°的受損小徑, 共有12條近乎垂直切穿小徑的裂隙,本小徑寬度小於平行成功路的 柏油小徑,走向約215°~225°,裂隙寬小於成功路上和平行成功路的 柏油小徑的裂隙寬,約1公釐;兩旁的水泥溝與房屋圍牆也有裂隙, 將其列為此地區之第三組地表裂隙。

#### 5.1.2 小山社區

小山社區位在一 Y 型交叉路口,由成功路、中興路一段和中華 路構成,此區段的台 28 號道路是由中興路一段和中華路連接組成, 往西稱中興路一段,往東則稱中華路;附近地勢平坦,交叉路口各側 皆有住家。成功路路寬約 11 公尺,地表裂隙出現始於交叉路口北邊 約 60 公尺處,並向中華路延續出現,而在中興路一段則是有兩條明 顯的地表裂隙,地表裂隙與受損房屋分布如圖 5.3,本研究將此區地 表裂隙依所在位置劃分為成功路——中華路、中興路一段及右側柏油小 徑,以下分段介紹。

在成功路—中華路西北東南向的馬路上可觀察到七道非常明顯 的地表裂隙,如圖 5.3 的 F1~F7。這些地表裂隙皆屬鋸齒狀開張型裂 隙,開裂寬平均為5公釐,而最寬的一道可達3公分;長度的部分, 除了圖 5.3 中的 F4、F7 外,其他五道皆有數十公尺長,走向各道有 些許不同,介於 210°~250°間,並有一些延續性較差、方向介於 230°~250°的短裂隙分布在成功路與中華路上。 地表裂隙 F2 為此區裂 隙延續性最好的,長約30公尺,其方向並沒有太大的改變,破裂型 熊與一般道路出現的柏油路因疲乏或車轍造成之破壞型熊明顯不同, 如照片 5.1.2-1。地表裂隙 F3 與地表裂隙 F2 雷同,長度約 20 公尺, 裂隙開口最寬達 3 公分;地表裂隙 F5 雖整體延續性佳,但裂隙方向 在中華路向中興路一段延伸時,有較明顯的改變(如照片 5.1.2-2),且 延續至中華路中間後,裂隙與柏油路疲勞或車轍所造成的裂隙結合, 並分岔成兩道後,又再結合成一道,向中興路一段方向延伸(如照片 5.1.2-3),因此本研究認為此裂隙應是柏油路原有些許的疲勞破壞, 受甲仙地震影響,造成地表裂隙沿原本存在的疲勞破壞處出現,並向 前後延伸,而延伸的部分其開裂縫相較疲勞破壞處新鮮。地表裂隙 F6 相較其他道裂隙較為不同,該裂隙並非連續成一道,而是斷斷續 續的,儘管其並非是一道連續完整的裂隙,卻可從中華路追跡至受損 連棟樓房 H6 的左後方,長約 60 公尺,走向約為 220°,本裂隙穿過

三種不同材質的地面,包含柏油(如照片 5.1.2-4)、水泥地面(如照片 5.1.2-5)及土壤(如照片 5.1.2-6、7);地表裂隙 F6 在中華路上的開裂寬 達 1.5 公分,往西南延伸開裂寬漸變小,且在左側車道上與較短的兩 道向右跳躍裂隙呈雁行排列,裂隙從中華路延伸至受損連棟樓房 H6 西南側的土壤空地上,其開裂寬達 3 公分(如照片 5.1.2-6),並繼續向 未受損平房 H8 的前院水泥空地延伸。

中興路一段離Y型叉路口約二十公尺的建築物H7(如圖 5.3,為 農民直賣所)兩側距離相似的位置,各有一道裂隙,即圖 5.3 中的 F9 和 F10,東側裂隙走向為 5°(即圖 5.3 中的裂隙 F9,照片 5.1.2-8),西 側裂隙走向 355°(圖 5.3 中的裂隙 F10,照片 5.1.2-9),這兩道裂隙皆 在道路中間與柏油路的疲勞破壞結合後,再貫穿柏油路,且 F10 往北 甚至延伸到水溝的水泥護牆,並可見該裂隙在水泥護牆的垂直面以高 角度開裂(照片 5.1.2-10),而建築物 H7 的地板也有損壞情形。儘管這 兩道地表裂隙也相當明顯,但與先前觀察到近乎橫切道路之裂隙方向 不同,再加上只有兩道接近南北向的裂隙,故本研究暫時不把這兩道 裂隙加入討論。

離 Y 字叉路口約二十米的中華路右側柏油小路上,有至少八道 橫切小路的鋸齒狀開張裂隙,開裂口一般皆小,僅1公釐寬,走向大 約是 325°,與高美醫專地區觀察到平行道路的地表裂隙方向相同,圖 5.3 中的裂隙 F16 為最南邊的一道。由於柏油小徑寬度窄,這些裂隙 相對延伸性較差,且裂隙方向與中華路平行,本研究推斷這些裂隙與 柏油小徑本身結構和地震波之間有較大的關連性,不再多加探討。

另外,樓房 H1(即幸福家庭清洗店)的騎樓地板有數道交錯的裂隙, 多處沿裂痕出現凹槽,這些凹槽呈不規則形,但基本上為狹長凹淺。 獨棟平房 H3 及 H8 的前庭水泥地板皆有開張裂隙,方向約為

210°~230°,連棟樓房 H6 其中一戶的騎樓有一道裂隙,方向約 230°, 該裂隙有延伸至屋內,這幾道裂隙與橫切道路之裂隙方向相符,本研 究認為這幾道裂隙可能為中華路上的裂隙延伸,將其歸類為探討對象 之一。至於房屋損壞情況則是有幾戶在牆壁出現裂隙、天花板磁磚有 脫落情形,也有圍牆倒塌及出現垂直開張裂隙,這些現象提供了盲斷 層位置相關訊息,但因這些非本研究主要探討對象,故在此不多加說 明。

#### 5.1.3 文昌宮

文昌宮位置位在台 28 號道路(即中華路)的東側路邊,本區域僅 觀察到一道較為明顯的鋸齒狀開張裂隙,位置是在小山社區至文昌宮 的路上,離文昌宮約100公尺,本裂隙開裂寬約1公分,長約8公尺, 切穿南下車道但並未延伸至北上車道,走向為220°,如照片5.1.3-1。

#### 5.1.4 龍肚街口與龍肚國中

文昌宮往南,於台 28 號道路(即中華路)與龍肚街的十字交叉路 口也有發現一些裂隙,中華路兩側分別為龍肚街跟小巷道,本研究將 此區稱為龍肚街口。中華路相對兩側道路略為高起,所以在龍肚街、 小巷道與中華路之銜接處皆為一緩斜坡。此區的地表裂隙多出現在中 華路與其平行的水泥人行道及人行道與房屋的接縫處(如照片 5.1.4-1), 方向約為 345°;從裂隙出現的位置和方向,判斷這些裂隙應和高美醫 專觀察到在成功路東側與水泥的接縫處及鄰近接縫處的開張裂隙雷 同,是道路結構在接縫處相對脆弱特性相關,故本研究不列為探討的 對象。另外,有一道鋸齒狀開張型裂隙從小巷道向龍肚街延伸,長約 5 公尺,走向約為 200°(如照片 5.1.4-2、3),裂隙開口寬約 2~3 公釐, 其在接近道路中央時,與原本就已存在的柏油路疲乏破壞連接,但方 向並未有太大改變。此道裂隙與先前其他區域觀察到的橫切道路之地 表裂隙相類似,但因這個方向的裂隙在本區段僅出現一條,本研究暫 時不把這道裂隙加入討論。

再往東南方,於台 28 號道路(即中華路)與獅山街(高屏 103 縣道) 的十字交叉路口,發現其路旁的連棟樓房之騎樓外水泥斜緩坡與道路 連接處有一、兩道數公尺的鋸齒狀開張型裂隙,從這些裂隙出現位置 及方向研判,應與道路和水泥斜緩坡結構在接縫處相對脆弱特性有關, 故本研究不再加以探討;中華路與獅山路的連接處有一道走向近乎與 中華路平行,角度約為 320°的裂隙(如照片 5.1.4-4),長約 6 公尺,其 開裂僅侷限在柏油路上,而在獅山街街口往南約 40 公尺內,也有幾 道方向幾乎相同且長皆為 7~8 公尺的地表裂隙,這與在高美醫專和小 山社區的柏油小徑觀察到的第二組地表裂隙(即平行主要幹道或台 28 號道路方向)相似,本研究研判成因可能與地下管線較相關,將不再 進一步探討此組裂隙。

#### 5.1.5 竹子門

從龍肚國中繼續沿中華路走約800公尺後,可以看到一右轉之斜 坡(如照片5.1.5-1),從地圖上看,會發現中華路於此處轉了兩個大角 度的彎,道路成一斜乙字形。龍肚國中到右轉斜坡為西北東南走向, 當到了中華路東側車道旁有一南無觀世音菩薩像時,中華路向右轉約 120°,呈南北向;再向南延伸約600公尺後,於萬善祠向左轉90°, 轉彎後中華路呈東西向。此區地形以南北向的中華路為分界,西側是 平坦的平原區,種植許多農作物,東側則是植被茂盛的高地,兩側高 差約為20公尺,且在西側下方有竹子門溝流過,如圖5.4。

本區如先前各區域一樣,觀察到的裂隙是鋸齒狀開張型。根據地 表裂隙走向及破壞形式,大致可分成三組,第一組為橫切中華路的地 表裂隙,走向為 210°~280°間,可以明顯觀察到的至少有十五道;第 二組為與中華路平行的地表裂隙,其裂隙開口大,延伸性好,相較於 在其他處觀察到與道路平行之裂隙,在裂隙兩側有明顯高低差,且隨 馬路轉彎其走向也跟著轉彎;第三組主要出現在兩種不同材質的接縫 處,如柏油路與水泥地的銜接處,和前幾處觀察到道路結構在接縫處 相對脆弱特性相關,故以下不再多加討論。底下將此路段分成四個區 段做更詳細的描述。

 區段 1:為中華路第一個右轉斜坡前至右轉斜坡路旁的南無觀世 音菩薩像,地勢無明顯變化,屬平坦的,可以看到至少四道明顯橫切 馬路的裂隙,如照片 5.1.5-2,開裂寬僅 1~2 公釐,長約 11~12 公尺, 走向約 225°~235°,屬第一組裂隙。

區段 2:過了第一個右轉斜坡後,呈南北向的區段,實際距離是 從南無觀世音菩薩像至萬善祠,本區最明顯的為第二組地表裂隙,即 與平行道路並會隨道路轉彎之裂隙。此裂隙可以分成兩段,分別為地 表裂隙 F2a 與 F2b(如圖 5.4),F2a 從右轉斜坡至台 28 號道路 40 公里 標示牌往南約 40 公尺,總長約 125 公尺,並中止在本路段上坡終點, 如照片 5.1.5-3~5.1.5-5;F2b 約從本路段第一個東側路口至第二個東 側路口南邊約 40 公尺處,總長約 175 公尺,約始於緩下坡起始處, 最後終止約在緩下坡結尾處,如照片 5.1.5-6~5.1.5-8。近看可以發現 裂隙是由一系列長數十公分或數公尺的鋸齒狀開張型裂隙所組成,裂 隙最大開裂寬可達 1.5 公分;在 F2b 尾端東側車道也出現約 10 公尺 長的鋸齒開張型裂隙,裂隙形狀呈類似魚鉤狀(如照片 5.1.5-9、 5.1.5-10),其切過雙黃線時,可以明顯觀察到有錯移量,也能明顯看

到裂隙在路面兩側是東側較西側高(如照片 5.1.5-9、5.1.5-11)。由於中 華路兩側有高差,且在西側下方有竹子門溝流過,本區段道路地表裂 隙除了上述 F2b 尾端那道於東側魚鉤狀裂隙外,其他都是出現於西側, 又可觀察到裂隙兩側有明顯高低差,呈現東高西低的趨勢,故推斷此 裂隙應是位於斜坡上,再加上西側下方至竹子門溝距離相當近,推測 西側坡度屬較陡的坡,因此裂隙成因應與地形上的差異及地下管線相 關,非本研究探討的對象。

在南段東側有一個四邊不等長的大魚池,魚池的南側有一柏油小 路,與中華路垂直,而這交叉路口即上述提到的第二個東側路口,在 與中華路的銜接處及東側約5公尺處,各有一道裂隙,銜接處的裂隙 大致走向為南北向,但相當蜿蜒,推斷此裂隙應和在高美醫專觀察到 在成功路東側與水泥的接縫處及鄰近接縫處的開張裂隙雷同,為第三 組裂隙,與道路結構在接縫處相對脆弱特性相關,本研究不再加以探 討。另外,本區段也有至少四道橫切中華路的裂隙,走向約 260°~270°。

區段 3:為中華路從南北向轉呈東西向的區段,主要以橫切馬路的地表裂隙為主,開裂寬約5公釐,長約11~12公尺,除了F11為305°外,其餘走向皆在230°~260°間。因此處為一緩坡彎道,判斷裂隙可能與道路轉彎及斜坡有關。本區段在萬善祠前有一道與道路平行的裂隙,即圖5.4中的F10,它與區段2平行道路之裂隙相似,出現的位置在西側車道路旁,推測成因應與區段2的相同。

 區段4:為中華路左轉後呈東西向的部分,此區段周遭地勢平坦, 地表裂隙 F15、F16 切過中華路,方向約為 200°~230°,屬第一組地 表裂隙。其中 F15 是兩條裂隙複合而成,從南側車道向竹門路3號延 伸,如照片 5.1.5-12、5.1.5-13。而竹門路3號前為柏油空地,有三道

走向不同的裂隙,開裂寬皆僅1公釐,走向約略呈南北向。竹門路3 號繼續往西至公車站牌的距離間,在北側柏油小路皆可觀察到方向大 約與中華路平行,且橫切穿小路的裂隙(如照片 5.1.5-14),其旁的道 路牆也有垂直方向裂縫(如照片 5.1.5-14),由於在小路的寬度相對中 華路窄,裂隙本身延伸性相對於中華路所觀察到的較差,本研究推斷 在小路中觀察到的橫切小徑之裂隙可能是原有裂縫於地震後加大、加 寬、加深,與小路本身結構較相關,因此非本研究所探討對象,不再 多加探討。

其他:在中華路南側的竹子門溝溝牆和其兩旁的柏油路同樣可觀 察到明顯的裂隙,在這裡觀察到的地表裂隙亦屬橫切切穿柏油路的 (如照片 5.1.5-15)。柏油路與水溝牆連接,且柏油路對面也是水溝牆, 表示側向為自由面,在水溝牆上也能觀察到與水道垂直的裂縫(如照 片 5.1.5-15),故判斷這些裂縫應與地震時受到側向擺動而超過結構物 能承受之強度有較大關聯,非本研究探討對象。於台 28 號道南側, 獅山大圳旁的柏油小徑及獅山大圳水泥壁上同樣也觀察到裂縫,柏油 小徑上的地表裂隙亦屬橫切穿柏油路的,走向約 297°,有約一公分的 錯移量,如照片 5.1.5-16、5.1.5-17;由於在此處僅觀察到此道為相較 明顯的裂隙,較難直接推測其成因,故目前初步先不將其列入探討對 象。

綜合上述,可以發現地表裂隙依照方向及分布位置主要可分成三 組,第一組裂隙為橫切道路的,走向約 215°~260°;第二組裂隙與道 路近乎平行,走向約 320°~350°;第三組裂隙則出現在道路與路旁水 泥地或水溝交接處;統整結果呈現具有明顯方向性的裂隙為第一組及 第二組地表裂隙,但從應變橢圓圖的觀點來看,可知當逆斷層方向為 西北—東南方向時,可能會產生東北—西南走向的開張裂隙,再加上 由前人提供的野外資訊加以判斷這些裂隙可能的形成成因,可知第二 組與第三組地表裂隙主要和道路本身結構、地下管線分布、震波等有 較大的關連性,而符合應變橢圓且其形成原因較有可能與斷層錯動引 起的近地表變形有關的地表裂隙為第一組地表裂隙,因此本研究主要 以第一組地表裂隙作為探討對象。地表裂隙於各個區域的方向如表 5.1 和圖 5.5、圖 5.6。

## 5.2 強地動資料計算結果

因目前台灣並沒有較合適本研究區域及本地震的尖峰地動速度 (Peak Ground Velocity, PGV)與尖峰地動應變(Peak Ground Strain, PGS) 關係式修正參數,因此本研究主要利用公式(3)來計算研究區域附近 的尖峰地動應變(PGS)。此計算式中需用到的參數有尖峰地動速度 (PGV)和地下 30 公尺的剪力波波速,尖峰地動速度(PGV)是引用 Huang et al. 於 2011 年利用臺灣強地動觀測網(Taiwan Strong-Motion Instrumentation Program, TAMIP)紀錄到的資料所換算後之結果,如圖 5.7;而 Vs30 則是利用 TAMIP 測站的地下 30 公尺平均剪力波波速進 行計算。

本研究探討之地表裂隙主要集中在高雄市美濃區,美濃區除了有 地表裂隙外,同樣也有建築物嚴重損害,例如在龍肚社區、龍東街等, 所以除了計算美濃地區的尖峰地動應變(PGS)外,本研究另外挑選幾 個鄰近的位置及甲仙地震時有建築物損毀的地區也一併計算其尖峰 地動應變(PGS),計算結果如表 5.2。

在距離震央較近的高雄市六龜區有嚴重的建築物損毀情形, 旗山 區是距離出現地表裂隙位置最鄰近的區域, 同樣也有建築物損毀情形, 但受限於這兩處沒有 TAMIP 測站,未能得到 Vs30 的資料,因此未計算。

## 5.3 彈性半無限空間斷層錯位模擬結果

本研究利用 Okada(1992)推導有限矩形斷層每單位滑移量在地表 產生的位移之解法,再進一步計算斷層錯動造成的地表應變量。主要 使用到的參數包含了斷層長度 L、斷層寬度 W、距地表深度 d、斷層 走向 $\alpha$ 、斷層傾角 $\delta$ 、錯移量 $(U_1, U_2, U_3)$ 、剪力模數 G 及泊松比 $\rho$ 。 由 Wells and Coppersmith (1994)、吳相儀(2000)可知地震規模與地震 斷層或活動斷層之破裂長度、破裂面積、位移的關係相當密切,地震 規模越大,斷層的破裂面積亦會越大。甲仙地震的地震矩規模( $M_W$ ) 為 6.4,本研究假設斷層長為 50 公里,寬為 40 公里,並設為常數; 同時也將斷層走向 $\alpha$ 、剪力模數 G 與泊松比 $\rho$ 設為常數。

於初步的模擬時,本研究參考 Hsu et al.(2011)使用的斷層模型之 斷層傾角及 Lee et al.(2012)推測的斷層最大滑移量,模擬結果如圖 4.6、 4.7,得知四件事:(1) 斷層錯動造成之地表的應變量大小於 500 百公 尺內,應變量會有相當大的差別;(2) 最大地表應變量會出現在斷層 延伸至地表的位置;(3) 由應變圖可發現,在斷層延伸至地表的南北 兩側的應變方向轉向且有較明顯的張應變,其餘位置的張應變相對較 小,甚至幾乎看不出有張應變;(4) 在斷層延伸至地表位置的應變量 可達10<sup>-4</sup>,表示若斷層延伸至地表的位置有經過高雄市美濃區,且剛 好美濃區是位在斷層延伸至地表的南北側,則美濃地區之地表裂隙就 可能為盲斷層錯動引致近地表變形造成的。

經彙整後的地表裂隙方向與初步模擬結果,我們假設這些地表裂 隙與盲斷層錯動有相關性,並修改模擬時的斷層面,示意如圖 5.8。

另外,先前文獻回顧的部分,已知不同研究推算之斷層傾角δ與斷層 模型之滑移量大小有些許不同,如表 2.1、2.2;在上個章節中的參數 效應,也了解斷層傾角δ、斷層上部距地表下深度 d 及滑移量皆會影 響地表應變量的大小,彼此也會互相影響。本研究透過不同參數與地 表應變量的關係,如表 4.1~4.3,並加以推測未考慮地形條件下,斷 層投影至地表的位置,如圖 5.9。

接著,在前人調查及研究結果部份可知,斷層錯動造成若要使人 行道、街道、土壤中出現具有方向性的地表破裂或地表裂隙,其地表 之應變量需達到10<sup>-4</sup>,而小於10<sup>-4</sup>則不可能會出現地表破裂情形。而 模擬結果可知,當斷層距地表深度 500 公尺時,無論斷層傾角大小與 滑移量大小,地表應變量皆未達10<sup>-4</sup>,表示斷層需延伸至離地表更近 的位置,地表才有可能出現裂隙;當距地表深度 300 公尺時,斷層傾 角 30°到 40°間為一轉換區間,假使逆移分量達到 0.3 公尺,會由原先 無法產生地表裂隙變成有可能產生地表裂隙的情形,這也代表除了斷 層距地表深度外,斷層傾角與逆移分量在此時影響了地表裂隙是否產 生;而當斷層延伸至距地表下 100 公尺時,地表應變量皆達10<sup>-4</sup>,這 表示當斷層延伸至距地表下 100 公尺或更接近地表時,即使斷層是在低 角度情況下,也可能於地表產生破裂或裂隙。故當逆衝斷層距地表深 度小於 500 公尺,斷層傾角越大,逆移分量越大,地表就越有機會產 生由斷層錯動造成的地表破裂與裂隙。

綜合甲仙地震前人野外調查結果,認為第一組具方向性的開張型 地表裂隙與盲斷層錯動有密切關聯,本研究透過美濃區一系列具方向 性的開張型地表裂隙之方向與出現地點,再加上模擬結果,推測了斷 層投影至地表位置,並推斷此斷層傾角大於35°,斷層尖端位置在距

地表深度 100~300 公尺間。

地點	裂隙方向		
	横切或斜切道路	近乎平行道路	
高美醫專	245°~260°	320°~325°	
小山社區	215°~250°	320°~330°	
文昌宮	220°	無	
龍肚街口與龍肚國中	200°(不探討)	320°	
竹子門	230°~260°	300°~345°	

表 5.1 地表裂隙於各個區域的方向

表 5.2 PGV、Vs30 與 PGS 之結果

位置	TAMIP	破壞型式	PGV	Vs30	PGS
			(m/s)	(m/s)	
高雄市美濃區	美濃國小	地表裂隙與 建築物損毀	0.18	344.21	5.2×10 <sup>-4</sup>
高雄市杉林區	上平國小	建築物損毀	0.3	813.23	3.7×10 <sup>-4</sup>
高雄市田寮區	崇德國小	隧道與橋梁 輕微損毀	0.15	304.66	$4.9 \times 10^{-4}$
高雄市燕巢區	燕巢國小	未有損毀	0.125	261.6	$4.8 \times 10^{-4}$
台南市玉井區	玉井國小	學校建物嚴 重損毀	0.35	597.85	5.9×10 <sup>-4</sup>
台南市新化區	口埤國小	土壤液化	0.4	287.66	$1.4 \times 10^{-3}$



圖 5.1 高雄市美濃區地表裂隙集中出現與建築物受損嚴重區域。黃色區塊表示地表破壞帶方向約成西北-東南走向。



圖 5.2 高美醫專地區地表裂隙與受損建物分布圖。



圖 5.3 小山地區地表裂隙與受損建物分布圖。



圖 5.4 竹子門地區地表裂隙與受損建物分布圖。



圖 5.5 高雄市美濃區地表裂隙分布位置與方向及建築物受損嚴重區域。





## 圖 5.6 地表裂隙走向玫瑰圖。



圖 5.7 甲仙地震 PGV 圖。(引自 Huang et al., 2011)



圖 5.8 修改初步模擬之斷層面投影至地表示意圖。



圖 5.9 甲仙地震所有破壞位置分布與在未考慮地形條件下本研究假 設斷層面投影至地表之位置。



照片 5.1.1-1 高美醫專分校至主校區,地勢上略為抬升。(劉彥求 攝)



照片 5.1.1-2 高美醫專附近之成功路上裂隙,可看到裂隙延伸至水泥 護牆上。(劉彥求 攝)



照片 5.1.1-3 高美醫專前地表裂隙 F3。



照片 5.1.1-4 高美醫專前地表裂隙 F6,其向西延伸至礫石水泥地道上。(劉彥求 攝)







照片 5.1.1-6

高美醫專地表裂隙 F7 向西側之水泥護牆及礫石水泥斜坡延伸。(黃文 正 攝)



照片 5.1.1-7 高美醫專分校南側之平行道路的地表裂隙,從照片中可 看出位於上坡,推測其成因與地下管線及柏油路疲乏相關。(劉彥求 攝)



照片 5.1.1-8 高美醫專西側平行的柏油小徑, 即圖 2 中的受損小徑一號上的水泥溝明顯損害。(黃文正 攝)



照片 5.1.2-1 柏油路車轍疲勞破壞。



照片 5.1.2-2 小山社區地表裂隙 F5 起始位置與延續方向。(黃文正攝)



照片 5.1.2-3 小山社區地表裂隙 F5 往東北方看,於分叉點可看到 F5 與疲勞或車轍所造成的裂隙結合。(黃文正 攝)



照片 5.1.2-4

照片 5.1.2-5

小山社區地表裂隙 F6 分別在柏油路與水泥空地上之延伸。(黃文正攝)



照片 5.1.2-6

照片 5.1.2-7

小山社區地表裂隙 F6 在小礫石泥土空地上之延伸。(黃文正 攝)



照片 5.1.2-8

照片 5.1.2-9

小山社區地表裂隙 F9 與 F10。(黃文正 攝)



照片 5.1.2-10 小山社區地表裂隙 F10 往北延伸至水泥溝牆,水泥溝 牆垂直面以高角度開裂。(黃文正 攝)


照片 5.1.4-1

照片 5.1.3-1 文昌宫區域之地表裂隙,長約8公尺,切穿南下車道但 並未延伸至北上車道。(黃文正 攝)

照片 5.1.4-1 龍肚街口之地表裂隙出現在中華路與其平行的水泥人 行道及人行道與房屋的接縫處。(黃文正 攝)



# 照片 5.1.4-2

照片 5.1.4-3

龍肚街口北北西走向之裂隙,從小巷道向龍肚街延伸。(黃文正 攝)



照片 5.1.4-4 獅山街口平行中華路之地表裂隙,僅出現與柏油路上。 (黃文正攝)



照片 5.1.5-1 大埼下至竹子門之右轉之斜坡。



照片 5.1.5-2 竹子門地區地表裂隙 F1,位在大崎下至竹子門右轉的 斜坡之前。(黃文正 攝)



## 照片 5.1.5-3

照片 5.1.5-4

朝南拍攝竹子門地區地表裂隙 F2a,裂隙從右轉斜坡開始至本路段上坡終點處,總長約125公尺。(黃文正 攝)



照片 5.1.5-5 朝北的方向拍攝之竹子門地區地表裂隙 F2a。(劉彥求攝)



照片 5.1.5-6 朝北的方向拍攝之竹子門地區地表裂隙 F2b,中華路在 此段為一緩下坡。(黃文正 攝)



照片 5.1.5-7 朝南的方向拍攝之竹子門地區地表裂隙 F2b。(黃文正攝)

照片 5.1.5-8 朝北的方向拍攝之竹子門地區地表裂隙 F2b。(劉彥求攝)



照片 5.1.5-9、5.1.5-10 朝北的方向拍攝竹子門地區地表裂隙 F2b 尾端,裂隙形狀呈類似魚鉤狀。(劉彥求 攝)



照片 5.1.5-11 在地表裂隙 F2b 尾端可以明顯看到裂隙兩側有高低差。 (劉彦求 攝)



照片 5.1.5-12 照片 5.1.5-13 地表裂隙 F15 從南側車道向竹門路 3 號延伸。(劉彥求 攝)



照片 5.1.5-14 區段 4 的北側柏油小路横切並切穿小路的裂隙,水泥 牆上也有垂直方向裂縫。(劉彥求 攝)



照片 5.1.5-15 竹子門溝溝牆及其兩旁的柏油路皆可觀察到明顯的裂隙。(劉彥求 攝)



照片 5.1.5-16 獅山大圳旁橫切柏油小路的裂隙,裂隙左右兩側有約 0.5 公分的高低差,並有約1公分的錯移量。(張中白 攝)



照片 5.1.5-17 獅山大圳旁橫切柏油小路的裂隙往獅山大圳水泥壁上延伸, 並和高角度閉合的裂隙相連。(黃文正攝)

# 第六章 討論

甲仙地震是台灣近幾年西南部規模較大的地震之一,且有災情傳 出,儘管甲仙地震並未在地表出現明顯之地表破裂跡,但在蒐集並彙 整前人野外調查結果顯示,於美濃地區出現一系列的開張型裂隙,分 布範圍約四至五公里,本研究主要目的即為探討這些地表裂隙與斷層 錯動導致之近地表變形是否相關?故本章節首先比對地表裂隙方向、 型態與模擬結果可否相符,再進一步將本研究推測之斷層位置與前人 推斷之斷層位置做比較。

### 6.1 模擬結果與地表裂隙方向比對

首先,彙整野外調查結果後,於美濃地區可統整出三組地表裂隙 具有方向性或有特定出現位置,在排除其他因素為造成地表裂隙之主 因後,以第一組地表裂隙為本研究主要探討對象,即橫切道路的,走 向約從 215°到 260°。前人利用震源機制解與餘震分布推出甲仙地震 應由西北—東南走向並向東北傾斜之逆衝斷層引起,而從應變橢圓 (如圖 4.3)圖得知要產生一西北—東南走向之逆衝斷層,需是在東北— 西南走向上受到壓縮力,且西北—東南也有拉張力的受力情況下,就 可能會產生與逆衝斷層垂直,即東北—西南走向的開張型裂隙。我們 將應變圖套疊至美濃地區出現地表裂隙之集中位置,如圖 6.1。

在前一章節模擬結果可知,依甲仙地震之條件,要產生受損較嚴 重的地表破裂是有困難性的,因地表應變量除了在斷層深度距地表 50公尺外,其他皆未達到10<sup>-3</sup>,且實際上甲仙地震並未在地表產生明 顯的地表破裂跡,此現象與模擬的地表應變量相符。再者,我們從模 擬的地表應變量可知,甲仙地震造成的地表應變量可達10<sup>-4</sup>,表示斷 層錯動有機會產生地表裂隙,但並非所有地表應變量達到10<sup>-4</sup>就會產 生地表裂隙,還需要考慮其應變型式與應變方向。

由圖 4.6 和圖 4.7 可明顯看出地表應變量最大會出現在斷層延伸 至地表的地方;接著再看應變圖顯示的應變形式,會發現除了在斷層 延伸至地表位置的南北兩側會出現有明顯張應變,其餘的斷層延伸至 地表位置僅看得出有明顯的壓應變,但幾乎無法直接觀察出有張應變, 這是因為逆衝斷層向地表延伸時,下盤相對向上擠壓抬升,使地表相 對隆起,於斷層延伸至地表的位置會受到最大的擠壓,且沒有空間使 其調整,造成斷層延伸至地表的位置出現明顯的壓應變,而在相對斷 層延伸至地表邊緣,有較大的空間調整,就會出現較明顯的張應變, 故在斷層延伸至地表位置的上下兩側,地表是有可能出現開張型裂隙 的。

接著,由模擬結果圖也可得到於斷層延伸至地表的邊緣,也就是 模擬圖中,斷層面延伸至地表位置的南北兩側,除了有明顯的張應變 外,應變方向也有轉向,其會受到斷層傾角、斷層距地表深度及滑移 量的影響而有所差異,旋轉角度約在 20°~40°間。本研究透過美濃地 區地表裂隙集中位置,推算斷層走向約 310°~320°,與美濃地區地表 裂隙方向相差約在 60°~90°間,這與模擬結果之斷層延伸至地表南側 的應變方向相符。另外,觀察斷層延伸至地表位置之應變量大小,會 發現斷層延伸至地表位置的南北兩側相較於其他位置的應變量稍小 一些,但仍可在斷層延伸至地表深度小於 300 公尺、斷層傾角越大、 逆移分量越大時,於地表產生裂隙。

綜合上述模擬斷層錯動造成的地表應變形式、地表應變方向及地 表應變量大小,若引起甲仙地震之盲斷層,其斷層延伸至地表位置於

南側有通過高雄市美濃區,且其斷層傾角、斷層距地表深度和滑移量 皆在相符合的條件下,即可能於地表出現東北—西南走向的開張型裂 隙,故本研究認為高雄市美濃區的地表裂隙與斷層錯動造成之近地表 變形有相當的關連性。

#### 6.2 強地動資料分析結果與模擬結果討論

透過尖峰地動速度(Peak Ground Velocity, PGV)與尖峰地動應變 (Peak Ground Strain, PGS)關係式所得之甲仙地震震波造成的最大地 表應變量介在1.4×10<sup>-3</sup>~5.9×10<sup>-4</sup>(見表 5.2),由 PGV 與 PGS 關係計 算所得之地表應變量大小發現所得應變量已達地表破壞的門檻值,甚 至已有可能造成嚴重的破壞,但在出現最大地表應變量的地區,並未 有明顯嚴重的破壞發生;同時觀察其他地區之地表應變量與實際之地 震損毀情形,發現不管是有無建築物損毀或地表有無裂隙,其應變量 大小皆約在6×10<sup>-4</sup>至4×10<sup>-4</sup>間,且無法佐證破壞具方向性。

本研究藉由彈性半無限空間斷層錯位模擬得知,在斷層延伸至地 表的位置會出現最大地表應變量,且有特定應變方向與應變形式,顯 示斷層作用造成之破壞可具有方向性,而在斷層尖端投影至地表之南 端與美濃區觀察到的一系列具方向性之開張型地表裂隙相似。故本研 究認為於高雄市美濃區觀察到的第一組地表裂隙與斷層作用引致之 近地表變形有密切關聯。

儘管震波造成之地表應變量無法直接佐證具方向性之地表裂隙 是否由震波造成,但從應變量大小來看,皆已達地表破壞之門檻值, 且在美濃區同時也觀察到另外兩組雖具方向性或出現於特定位置之 地表裂隙,利用判釋這兩組地表裂隙的破壞方式,本研究認為這兩組

地表裂隙極有可能是因為震波加上本身結構等因素導致破裂。因此, 目前僅能得知震波仍有機會造成地表出現破裂,但未能提供指標性的 資訊以利判釋地表裂隙之成因。

#### 6.3 與前人研究推斷之斷層面位置比較

本研究將高雄市美濃區的地表裂隙資料,再加上以斷層長 50 公 里、寬 40 公里、傾角為 40°,斷層延伸至地表下 100 公尺,滑移量為 0.3 公尺的模擬結果,去推測的斷層面投影至地表位置,如圖 5.9,此 小節主要為探討本研究所推測之斷層面投影至地表位置與前人利用 GPS 及加上其他資料所推測之斷層面投影至地表位置做比較。

Ching et al. (2011) 利用彈性均勻應力降方法與台灣南部 139 個 GPS 連續測站紀錄到甲仙地震同震位移資料反演斷層幾何形貌與滑 移量分布,認為斷層走向在 318°~344°間,斷層傾角在 26°~41°間皆 可以符合 GPS 量測的資料,其推測之斷層面投影至地表位置如圖 2.6 或圖 2.11 中的長方形,圖 2.6 中的黑色箭頭為 GPS 測站觀測到的同 震水平位移,灰色橢圓為 95%的信賴區間。Hsu et al. (2011)利用震源 機制解、初始 P 波極性先估計斷層幾何,再用 GPS 同震位移和彈性 半空間錯位模型來反演斷層之幾何形貌與滑移量分布,圖 6.2 為 Hsu et al. (2011)繪製的 GPS 水平同震位移與其誤差,黑色橢圓為 95%的 信賴區間。而 Hsu et al. (2011)由 GPS 同震位移反演推估的斷層走向 為 324°,傾角為 40°,並將推測的斷層面投影至地表位置與 GPS 同震 位移資料疊在一起,如圖 6.3。

經上述我們可知, Ching et al. (2011) 和 Hsu et al. (2011)皆是利用 連續 GPS 測站測得之甲仙地震同震位移來反演斷層幾何形貌與滑移 量分布,其使用的為相同的資料,但兩人所計算的同震位移大小於某

幾個測站仍有些微差別,且兩人由斷層模型推測的同震水平位移量在 相同測站及斷層面投影至地表位置與滑移量也有差異,如圖 2.5、6.3。 再看到 Lee et al. (2012),其結合了遠震體波、GPS 同震位移以及近場 強地動資料進行聯合震源逆推分析,並使用 Hsu et al. (2011)所提出 的斷層位態,斷層走向為 324°,傾角為 40°,逆推所得到的斷層面投 影至地表位置、同震水平位移量與錯動量分佈如圖 6.4,將其與 Hsu et al. (2011)的比對,會發現儘管使用相同的斷層走向與傾角,但推測斷 層面投影至地表的位置同樣有些許差異。換而言之,即使皆使用了 GPS 測得的甲仙地震同震位移資料來做斷層模型的反演,但在斷層走 向、傾角及斷層面投影至地表位置的推估仍會因個人的判定及反演方 式不同而有所差異。

我們將 Ching et al. (2011)、Hsu et al. (2011)及 Lee et al. (2012)使 用的 GPS 同震位移資料與反演後之斷層面位置套疊在一起,如圖 6.5, 另外也將本研究所推斷之斷層位置套疊至圖中,如圖 6.6;由這兩張 圖可以看到,在美濃地區出現地表破裂位置的西側,有一名為 GPS 的 CISH 測站,其所測得的水平位移向西側量較大;Ching et al. (2011)、 Hsu et al. (2011)及 Lee et al. (2012)所推測的斷層上部投影至地表位置 皆在 CISH 測站附近,其中 Hsu et al. (2011)推測的斷層上部投影至地表位置 皆在 CISH 測站的東側,而 Ching et al. (2011)與 Lee et al. (2012) 則是推測斷層上部投影至地表位置在 CISH 測站的西側,這再次指出, 儘管使用相同的 GPS 同震位移資料,假使有加入其他的資料或者使 用的反推的方式不同,所推測出的斷層模型位置、滑移量大小就會有 差異。本研究套用前人推測的斷層傾角和滑移量至模擬中,並基於模 擬結果的地表應變量、應變形式與應變方向,假設美濃地區的地表裂 際與斷層錯動有相關,由此推測的斷層面投影至地表位置,如圖 5.9。 將本研究推測之斷層面投影至地表位置與前人所做的斷層面投影至地表位置相比,可以看出在斷層面位置有些不同,且斷層走向也 有些微的差異,其中 Hsu et al. (2011)和 Lee et al. (2012)的斷層走向皆 為 324°,而本研究推測的斷層走向為 310°~320°,在圖 6.6 中與 Ching et al. (2011)推測之斷層面走向較為相似。

甲仙地震造成所有破壞資料與地點中,高雄市旗山區與美濃地區 相鄰,在旗山區僅有旗美高中與新旗尾橋有些微的結構物損壞,而在 高雄市美濃區除了可以觀察到一系列有方向性的地表裂隙外,於美濃 國小、龍肚社區都有較明顯且較嚴重的建築物與結構物損壞。由前人 研究結果已知,當地表應變量達10<sup>-4</sup>有可能於地表觀察到破裂、裂隙 或損壞,再加上斷層造成之近地表變形最大的位置是在斷層延伸至地 表的位置,因此本研究認為,儘管 CISH 測站測量到的位移量屬相對 較大的,且前人推斷的斷層面較接近 CISH 測站,但本研究基於在美 濃區觀察到之地表裂隙集中位置與建物損毀情形的分布位置,認為斷 層延伸至地表的位置較接近美濃區,即斷層上部投影至地表位置是在 CISH 測站的東側。



圖 6.1 高雄市美濃區地表裂隙集中出現位置點套疊應變圖。圖中的應變方形圖並不代表應變量大小。



圖 6.2 Hsu et al. (2011)繪製的 GPS 水平同震位移與其誤差。黑色橢 圓為 95%信賴區間的誤差範圍。(Hsu et al., 2011)



圖 6.3 Hsu et al. (2011) 推測的斷層 面投影至地表位置與 GPS 同震位移。(Hsu et al., 2011)



圖 6.4 Lee et al. (2012)推測的斷層面投影至地表位置與 GPS 同震位移。(Lee et al., 2012)



圖 6.5 Ching et al. (2011)、Hsu et al. (2011)與 Lee et al. (2012) GPS 資 料與推測之斷層面投影至地表位置。同震位移之 95%信賴區間取自 Hsu et al. (2011) 。此斷層面投影至地表位置是在未考慮地形條件及 依據原始資料向地表延伸的情況下推測的。



圖 6.6 Ching et al. (2011)、Hsu et al. (2011)、Lee et al. (2012)與本研 究推測之斷層面投影地表位置。此斷層面投影至地表位置是在未考慮 地形條件及依據原始資料向地表延伸的情況下推測的。

## 第七章 結論

本研究蒐集前人野外調查的資料,經整理後發現在高雄市美濃區 有一系列具有方向性的地表裂隙,依地表裂隙的方向與出現位置,可 以分類出三組具有特定方向的地表裂隙,再經由判釋後,認為以橫切 道路的第一組地表裂隙較有可能與斷層錯動所造成之近地表變形有 關,這些地表裂隙方向約在 215°~260°且皆具有一定的延續性,而本 研究透過了解震波所引起的地表最大應變量與斷層錯動所造成的地 表應量大小與方向來探討這些地表裂隙的成因。

首先,利用尖峰地動速度(PGV)與尖峰地動應變(PGS)的關係來 計算甲仙地震之震波引起的地表應變量,因受限於強地動測站在本研 究區域的站位並不多,故僅取有地表下 30 公尺 S 波波速之測站來做 代表。由前人研究可知,當地表應變量達10<sup>-4</sup>時,地表可能會產生破 壞,像是建築物損毀、人行道或街道出現破裂情形;計算結果顯示, 不管是有無建築物損毀或地表有無裂隙,其應變量大小皆約在 6×10<sup>-4</sup>至4×10<sup>-4</sup>間,表示未能直接從尖峰地動速度(PGV)與尖峰地動 應變(PGS)之間的關係推測這些地表裂隙是否由震波所造成的,僅能 得知震波仍有機會造成地表出現破裂,同時也表示此方法目前未能提 供指標性的資訊以利判釋。

接著,利用彈性半無限空間斷層模型計算斷層錯動於地表造成之 最大應變量、地表最大應變量出現的位置與其應變形式,由模擬結果 可知斷層錯動造成之地表最大應變量會出現在斷層延伸至地表的位 置,且在左右 500 公尺內地表變化量會有相當大的差別;再由應變圖 的應變方向與應變形式,會發現在斷層上部投影至地表位置的南側最 有機會產生符合美濃地區觀察到的開張型的地表裂隙。基於應變的方

向與形式,本研究進一步套用前人的研究結果來探討可能形成地表裂 隙出現的情況,得知斷層傾角、斷層延伸至距地表深度及滑移量是相 互影響的,其中以斷層距地表深度對地表應變量影響最為明顯。當逆 衝斷層延伸至距地表深度小於 500 公尺時,斷層傾角越大、逆移分量 越大,斷層錯動所造成之地表破裂與裂隙就越有機會產生。以甲仙地 震為例,當斷層延伸至地表深度小於 300 公尺、斷層傾角大於 35°且 逆移分量 0.3 公尺時的情況下,皆會產生地表裂隙。

最後,本研究以這些地表裂隙與模擬結果推測可能之斷層面投影 至地表位置,並與前人利用 GPS 同震位移及加入其他資料所推測之 斷層面投影至地表位置加以討論,可知儘管同樣使用了 GPS 測得的 甲仙地震同震位移資料來做斷層模型的反演,但在斷層走向、傾角及 斷層面投影至地表位置的推估仍會因個人的判定及反演方式不同而 有所差異。本研究推測之斷層走向是以利用美濃地區地表裂隙集中出 現位置,再加上模擬結果,推得斷層走向與斷層面投影至地表位置, 本研究推測斷層走向約為 310°~320°間,如圖 6.6,由圖可發現與 Ching et al. (2011)推測之斷層面走向較為相似。將斷層面走向與地表裂隙方 向相互比對,發現相差約在 60°~90°間,這不但與模擬結果相符,也 表示美濃地區之地表裂隙與斷層作用引致之近地表變形是有密切相 關性的。

以上為本研究之結論,建議於未來研究中,可以嘗試將模擬中的 斷層面分成更多的小斷層面,並於不同的小斷層面帶入不同的滑移量, 以更精確的模擬真實情況,有助於研判地表觀察到的現象與斷層錯動 之間的關係。另外,也能嘗試將模擬中的斷層面傾角設為在不同深度 時為可變的,並將地表材料性質加入,探討不同材料性質對於斷層錯 動於地表引起之變形與地表應變量有多大的影響性。最後希望本研究

結果,提供對地震後於地表產生的裂隙有更進一步的認識,也提供另 一種見解,希望未來若再次有地震發生並產生地表裂隙或破裂時,可 以於判釋上提供些許幫助。

# 參考文獻

- Brace, W. F. and Byerlee, J. D., 1966, Stick-Slip as a Mechanism for Earthquake. *Science*, New Series, Vol. 153, No. 3739, p. 990-992.
- Bray, J.D., Seed R. B., Cluff, L. S. and Seed H. B., 1994, Earthquake Fault Rupture Propagation Through Soil. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 120, No. 3, p. 543-561.
- Bray, J.D., 2001, Developing Mitigation Measures for the Hazards Associated with Earthquake Surface Fault Rupture. Proceeding of Workshop on Seismic Fault-Induced Failures, Tokyo.
- Cruikshank, K. M., Johnson, A. M., Fleming, R. W., Jones, R., 1996, Winnetka deformation zone- Surface expression of coactive slip on a blind fault during the Northridge earthquake sequence, California.
- Ching, K. E. Johnson, K. M., Rau, R. J., Chuang, R. Y., Kou, L, C., Leu, P. L., 2011, Inferred fault geometry and slip distribution of the 2010 Jiashian, Taiwan, earthquake is consistent with a thick-skinned deformation model. Earth and Planetary Science Letters, Vol. 301, p. 78-86.
- Deffontaines, B. Lee, J.C., Angelier, J., Carvalho, J. and Rudant, J.P., 1994, New morphoneotectonic data in Taiwan: analyses of digital elevation model, SPOT and Radar images, and geodynamic implications. Journal of Geophysical Research, Vol. 99, p. 20243-20266.
- Deffontaines, B., Lacombe, O., Angelier, J., Chu, H. T., Mouthereau, F., Lee, C. T., Deramond, J., Lee, J. F., Yu, M. S., Liew, P. M., 1997, Quaternary transfer faulting in the Taiwan Foothills- evidence from a multisource approach. Tectonphysics, Vol. 274, p. 61-82.
- Gilbert, G. K., Humphrey, R. L., Sewell, J. S. and Soule, F., 1907, The San Francisco earthquake and fire of April 18, 1906 and their effects on structures and structural materials. U.S. Geological Survey. Bull. 324, Washington, D.C.
- Hashash, Y.M.A., Hook, J.J., Schmidt, B., Yao, J. 2001. Seismic design and analysis of underground structures. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 16, No. 4, p. 247-293.
- Huang, W. J., 2006, Deformation at the leading edge of thrust faults, Ph.D.dissertation, Purdue Univ., West Lafayette, Indiana, July.
- Hu, J.C., Hou, C.S., Shen, L.C., Chan, Y.C., Chen, R.F., Huang, C., Rau, R.J., Chen, H.S., Lin, C.W., Huang, M.H., Nien, P.F., 2007, Fault activity and lateral extrusion inferred from velocity field revealed by GPS measurements in the Pingtung area of southwestern Taiwan. Journal of Asian Earth Sciences, Vol.31, p. 287-302.

- Huang, H. H., Wu, Y. M., Lin, T. L., Chao, W. A., Shyu, B. H., Chan, C. H., Chang, C. H., 2011, The Preliminary Study of the 4 March 2010 Mw6.3 Jiasian, Taiwan, Earthquake Sequence. Terrestrial Atmospheric Oceanic Sciences Vol. 22, No. 3, p. 283-290.
- Hsu, Y. J., Yu, S. B., Kuo, L. C., Tsai, Y. C., Chen, H. Y., 2011, Coseismic deformation of the 2010 Jiashian, Taiwan earthquake and implications for fault activities in southwestern Taiwan. Tectonphysics, Vol. 502, p. 328-335.
- Hwang, R. D., Lin, T. W., Wu, C. C., Chang, W. Y., Chang, J. P., 2012, Reexamining the source parameters of the 2010 ML 6.4 JiaSian (Taiwan) earthquake using the inversion of teleseismic P-waves. Journal of Asian Earth Sciences, Vol. 48, p. 24-30.
- Johnson, A. M., Fleming, R. W.and Cruikshank K. M., 1994, Shear zones formed along long, straight traces of fault zones during the 28 June 1992 Landers, California, Earthquake. Bulletin of the seismological society of America, Vol. 84, No. 3, p. 499-510.
- Johnson, A. M., Fleming, R. W., Cruikshank, K. M., Packard, R.F., 1996, Coactive fault of the Northridge earthquake, Granada hills area, California.
- King, Geoffrey C. P., Stein, R. S., Lin, J., 1994, Static Stress Changes and the Triggering of Earthquakes. Bulletin of the Seiemological Society of America, Vol. 84, No. 3, p. 935-953.
- Lawson, A. C., 1908, The California earthquake of April 18, 1906 Report of the state earthquake investigations commission, Carnegie institute of washington publication. Vol. 1.
- Lee, S. J., Mozziconacci, L., Liang, W. T., Hsu, Y. J., Huang, W. G., Huang, B. S., 2012, Source complexity of the 4 March 2010 Jiashian, Taiwan, Earthquake determined by joint inversion of teleseismic and near field data. Journal of Asian Earth Sciences, Vol. 64, p. 14-26.
- Newmark, N. M., 1976, Problems in wave propagation in soil and rocks. Proceedings of the international symposium on wave propagation and dynamic properties of earth materials. University of New Mexico Press, p. 7-26.
- Okada, Y., 1985, Surface deformation to shear and tensile faults in a half-space. Bulletin of the seismological society of America, Vol. 75, p. 1135-1154.
- Okada, Y., 1992, Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bulletin of the seismological society of America, Vol. 82, p. 1018–1040.
- Peltzer, G., Rosen, P., Roges, F., Hudnut, K., 1998, Poroelastic rebound along the Landers 1992 earthquake surface rupture. Journal of Geophysical Research, Vol. 103, No. B12, p. 30131-30145.
- Paolucci, R., Smerzini, C., 2009, Earthquake-induced Transient Ground Strains from Dense Seismic Networks. Earthquake Spectra, Vol. 24, No. 2, p. 453-470.

- Reid, H. F., 1910, The mechanics of the earthquake. The California earthquake of April 18, 1906 ,report of the state earthquake investigation commission, Washington, D. C., p. 1-192.
- Rau, R. J., Lee, J. C., Ching, K. E., Lee, Y. H., Byrne, T. B., Chen, R. Y., 2011, Subduction-continent collision in southwestern Taiwan and the 2010 Jiashian earthquake sequence. Tectonphysics, Vol. 578, p. 107-116.
- Scholz, C. H., 1990, The Mechanics of Earthquakes and Faulting. Geological Magazine, Vol. 127, p. 613-614.
- St John, C.M. and Zarah, T.F., 1987, Aseismic design of underground structures. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 2, p. 165-197.
- Smerzini, C., 2008, Earthquake-induced transient ground strains and rotations from dense seismic arrays. Engineering Seismology.
- Tomita, Y., 1955, Some geomorphological considerations to the Chaochou fault in south Taiwan(Formosa), China. Science Reports, Tohoku University, Series 3:Mineralogy, Petrology, and Economic Geology, 4, p. 58-66.
- Tsan, S.F. and Keng, W. P., 1968, The Neogene rocks and major structural features of southwestern Taiwan. Proc. Geol. Soc., China, No. 11, p. 45-49.
- Tsai, Y. B., Teng, T. L., Chin, J. M., Liu, H. L., 1977, Tectonic implications of the seismicity in the Taiwan region, Memor. Geol. Soc. China, 2, p. 13-41.
- Teng, L.S., 1990, Geotectonic evolution of late Cenozoic arc-continent collision in Taiean, Tectonophys., Vol. 183, p. 57-76.
- Trifunac, M. D., Lee, V.W., 1996, Peak surface strains during strong earthquake motion. Soil Dynamics Earthquake Engineering Vol. 15, No. 5, p. 311-319.
- Trifunac, M. D., Todorovska, M. I., Ivanovic, S. S., 1996, Peak velocities and peak surface strains during Northridge, California, earthquake of 17 January 1994. Soil Dynamics Earthquake Engineering. Vol. 15, No. 5, p. 301-310.
- Van der Elst, N. J., Brodsky, E. E., 2010, Connecting near field and far field earthquake triggering to dynamic strain. Journal of Geophysical Research, Vol. 115.
- Wang, S., 1976, ERTS-1 satellite imagery and its application in regional geologic study of southwestern Taiwan. Petrol. Geol. Taiwan, No. 13, p. 37-57.
- Wells, D.L. & CopperSmith, K.J., 1994, New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, Surface Displacement. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 84, No. 4, p. 974-1002.
- Wu, Y. M., Teng, T. L., Shin, T. C., Hsiao, N. C., 2003, Relationship between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Intensity in Taiwan. Bulletin of the Seiemological Society of America, Vol. 93, No. 1, p. 386-396.

- Yu, S.B., Chen, H.Y., Kuo, L.C., Lallemand, S.E., Tsien, H.H., 1997, Velocity field of GPS stations in the Taiwan, Vol. 274, p. 41-59.
- Zerva, A., 2003, Workshop Proceedings on the effect of earthquake-induced transient ground surface deformations on at-grade improvements, May 28 2003, Oakland, CA, USA. Transient ground strains: estimation, modeling and simulation.
- 中國石油公司,十萬分之一地質圖—台南幅。中國石油公司臺探總處出版,1989。
- 吉田要,高雄州旗山南西部油田調查報告及旗山南西部油田地質圖(三萬分之一)。 台灣總督府殖產局,第610號,共162頁,1932。
- 邱俊穎,山腳斷層再活動對於台北盆地內地形變化之探討。國立臺灣大學理學院 地球科學系,2007。
- 何春蓀,臺灣地質概論-臺灣地質圖說明書。經濟部中央地質調查所,1986。
- 李元希,台灣南部地體構造環境。台灣活動斷層與地震災害研討會論文集,第 69-70頁,2004。
- 林啟文、陳文山、劉彥求、陳柏村,台灣東部與南部活動斷層,二萬五千分之一 活動斷層條帶說明書。經濟部中央地質調查所特刊,第23號,共178頁, 2009。
- 林啟文、張徽正、盧詩丁、石同生、黃文正,台灣活動斷層概論—五十萬分之一 台灣活動斷層分布圖說明書,第二版。經濟部地質調查所特刊,第13號, 共122頁,2000。
- 林朝祭,台灣地形。台灣省文獻委員會出版,1957。
- 林啟文、林偉雄、高銘健,經濟部中央地質調查所彙刊,第23號,2010。
- 林啟文、洪國騰,臺灣地質圖說明書之美濃圖幅。經濟部中央地質調查所,共 73頁,2012。
- 耿文溥,台灣南部甲仙及旗山間之地質。台灣省地質調查所彙刊,第19號,第 1-13頁,1967。
- 鳥居敬造,高雄洲旗山油田調查報告。台灣總督府殖產局出版,第633號,共 36頁,1933。
- 陳勇全, 六龜地區礫岩沈積環境與潮州斷層之研究。國立台灣大學地質科學研究 所碩士論文, 共 56 頁, 2004。
- 張徽正、林啟文、陳勉銘、盧詩丁,台灣活動斷層概論,五十萬分之一台灣活動 斷層分布圖說明書。經濟部中央地質調查所特刊,第10號,共103頁, 1998。

- 張麗旭、周敏、陳培源,民國 35 年 12 月 5 日台南之地震。台灣省地質調查所彙 刊,第1號,第11-18 頁,1947。
- 許雅儒,集集地震之震前、同震及震後變形模式研究。國立中央大學地球物理研 究所博士論文,2004。
- 國家地震工程研究中心,2010年0304高雄甲仙地震事件勘災報告。國家地震工 程研究中心,2010。
- 黃文正、陳致言、劉思好、林燕慧,台灣中部大甲溪至頭汴坑溪九二一集集地震 地表變形模式。經濟部中央地質調查所特刊,第12號,第63-87頁,2000。
- 葉永田、高清雲、陳承俊、高境良,台灣地區中度地震致災因素之探討。交通部 中央氣象局,2011。
- 詹新甫,臺灣南部楠梓仙溪流域之地質。臺灣省地質調查所彙刊,第15號,第 35-64頁,1964。
- 楊貴三,台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 學地理學研究所博士論文,共178頁,1986。
- 楊耿明,台灣西部平原區與麓山帶的構造地質。台灣之活動斷層與地震災害研討 會論文集,第144頁,2002。
- 經濟部中央地質調查所,20100304 地震地質調查報告。經濟部中央地質調查所, 共 86 頁,2010。
- 鄭世楠、葉永田、徐明同、辛在勤,台灣十大災害地震圖集。中央研究院地球科 學研究所及中央氣象局,第1-289頁,1999。
- 饒瑞鈞,台灣的地震地體構造。台灣之活動斷層與地震災害研討會論文集,第 31頁,2002。