

國立臺灣大學工學院土木工程學研究所

博士論文

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Doctoral Dissertation



斜移斷層引致上覆土層變形行為之研究

The deformation of overburden soil induced by
oblique slip faulting

詹佩臻

Pei-Chen Chan

指導教授：林銘郎 博士

Advisor: Ming-Lang Lin, Ph.D.

中華民國 106 年 6 月

June, 2017

國立臺灣大學博士學位論文
口試委員會審定書



斜移斷層引致上覆土層變形行為之研究

The Deformation of Overburden Soil Induced by Oblique Slip
Faulting

本論文係詹佩臻君 (D00521012) 在國立臺灣大學土木工程學系博士班完成之博士學位論文，於民國 106 年 6 月 23 日承
下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

林 銘 郎

(指導教授)

黃 燦 輝

董 家 鈞

李 崇 正

胡 植 慶

劉 桓 吉

沈 淑 敏

林銘郎

黃燦輝

董家鈞

李崇正

胡植慶

劉桓吉

沈淑敏

系主任

謝 尚 賢

謝尚賢

誌謝

感謝指導教授 林銘郎教授與岩力室大家長 黃燦輝教授，在博班期間悉心指導。感謝栽培我對大地問題產生興趣的兩位老師，地調所劉桓吉博士及北科大王泰典教授，老師們對治學的嚴謹態度及教學的熱忱，使我受益良多。感謝口試委員 董家鈞教授、李崇正教授、胡植慶教授及沈淑敏教授，對本文內容惠予指正及提供諸多寶貴意見，使本文更臻完善及嚴謹，在此謹表謝忱。

回顧博班生活，從 2011/9 到 2017/8 剛好六個年頭，在學期間修課—資格考—文章撰寫，歷經大小野外—參與計畫—考取技師，完成結婚—懷孕—生子，回首檢視才發現體驗過很多事情。這當中最感謝吾師，至今仍記得第一次與林老師面談是在小福的怡客，老師因為四年期計畫可以培訓博士生，所以試著爭取這個機會。對大學重考的我而言，跟臺大教授一對一面談很緊張，而且大學主修地質，徬徨是否能達成土木系教授的要求。感謝林老師給這個機會，除了順利入學，還提供很多平台接觸相關領域的人員，地調所、科技部及國發會的計畫合作；地質學會、地工技術基金會、大地工程學會及大地工程聯盟的野外活動；中興顧問、台灣世曦、富國工程及林同棧等業界案例交流；中國、日本、美國、歐洲的研討會。

這些活動豐富我的博班生活，也因為有一同需要完成的作業，跟工程地質研究室夥伴培養出一同熬夜一同拚底線得革命情感。謝謝為東、偉哲、心凱、玟菘、斯元、則維、建安、郁婷、承翰、士賢、佳倫、紹宸、貞怡、培軒、厚仁、亮均、正學、沛宸及陸安，有你們協助完成很多任務，包括暑期教學、寒假聯合野外、計畫報告等，這些活動有你們在都安心不少。感謝岩力室夥伴，雅筑學姊、家吉學長、雨璇、思緯，雖然座位沒有在一起，但是常常神支援！

感謝研究室博班學長們，體恤我的沒大沒小，謝謝春富學長引領斷層組研究，您的論文及砂箱儀器，協助我在斷層研究中有章可循；謝謝佳明學長在畢業後持續關心研究室學弟妹，敬佩您學習歷程及積極北上的心；謝謝聖心學長，讓我瞭解在職進修真的很辛苦，尤其當我知道您有三個孩子，更讓我佩服您堅持的完成學業；謝謝致翔學長陪我參加第一個出國研討會(2011 ISRM)，很榮幸可以同屆畢業；謝謝錫宏學長，讓我學習出野外的地質模型、手稿，體會到工作可以跟興趣結合是很美好的；謝謝健宏學長整頓研究室格局及風氣，並且有條理的指導學弟妹，完成團隊被指派的任務，讓我在後兩年可以更完善我的論文。

衷心感謝我的家人，我老公彥人及可愛的兒子昱昕，尤其是媽媽在母代父職之外，日以繼夜的在夜市工作，給我很大的發展空間，使我能無後顧之憂的念書。因此僅將此文獻給所有曾幫助過我與關心過我的貴人，致上深深的感謝。

中文摘要

台灣地區因板塊構造作用頻繁，依據經濟部地質調查所公告，33 條活動斷層其中 11 條為斜移斷層，斷層錯動時對鄰近斷層帶結構物受到的地震影響，除了強地動外，另一主要破壞因素為斷層基盤錯動所導致近地表岩土層土體變形及地表破裂，而斜移斷層錯動時會因其走向及傾向滑移量比之差異，影響破裂跡與剪裂帶在三維中的發展，對近地表土層變形行為之影響，實有進一步研究之需要。

根據近年來國內外災害性地震的研究，斷層錯動引致地表破裂案例中，土層受斷層引致變形之因素，受控於斷層傾角、滑移比 S/H (滑移量/覆土厚) 及上覆土層材料性質等參數影響，透過國內外地震案例彙整其地表變形影響範圍可由公尺等級到公里等級，並利用鄰近鑽探資料，統計其土層厚度並正規化地表變形影響範圍，其量化成果可用於後續物理模型試驗設計。

利用室內砂箱試驗模擬，為了解斷層兩側覆土層地貌分布、地表線型、斷層錯移在近地表影響範圍、坡向分析等，簡化參數採用 90 度斷層傾角，填充無凝聚性砂，針對滑移角、基盤滑移比及覆土厚度等，共設計八組不同條件之試驗。

結果顯示滑移比達 0.15 時地貌形成丘谷地形，而後期再錯動，對既有地形高程差異不大。地表破裂跡線形的角度，隨著滑移量增加至 0.2 時，破裂跡與斷層面投影的夾角會到達一個峰值約 ± 40 度後下降。而最大影響範圍為純走向滑移斷層，影響範圍約為對稱出現於斷層投影線兩側，合計約 1 倍覆土厚度。當斷層活動時具有傾向滑移分量，影響範圍位置將會偏態，移至地形陷落側，而走向及傾向滑移分量共存時，斷層影響範圍較純走向滑移模型小，約為 0.5 倍覆土厚度。

斷層錯動後，原平坦地面受到斷層作用擠壓伸張後坡向顯著變化，而坡向方位主要受傾向滑移影響，優勢坡向面積比達 40% 以上，亦可指示斷層線形，回歸斷層滑移角與地表優勢坡向面積比之關係，得到 2 次多項式分布，可利用地貌坡向回推斷層滑移角。剖面觀察斷層尖端發展時，傾向滑移之模型，斷層尖端開始

向上時，其斷層面角度較陡；當斷層尖端擴展接近地表時，其角度變緩，顯示地形上高程差會擠壓斷層面至地勢較低區域。

選用 2016 熊本地震與砂箱試驗進行比對，推論此區斷層主要為走向滑移，及下期事件破裂跡可能影響區域提供減震考量，並計算現地土層厚度 6.8 至 8.8 公尺。

透過本研究之簡化模型進行基本行為觀察及定量分析，亦可協助推測斷層破裂跡於上覆土層中發展情形，有助於判斷破裂跡可能出露位置，以及未來發展情形，提供斜移斷層引致上覆土層變形之未來災害防治的重要貢獻。

關鍵詞：斜移斷層;近地表變形;物理砂箱試驗;數值地形高程

英文摘要

Tectonic activities derived from the convergence of the tectonic plates frequently occur in Taiwan. The Central Geological Survey, Ministry of Economy Affairs (CGS, MOEA), proclaimed 33 active faults over Taiwan, and 11 of them are oblique-slip faults. according to the investigations of well-known disastrous earthquakes in recent years, ground deformation (ground strain and co-seismic surface rupture) induced by faulting is one of the causes for engineering structure damages in addition to strong ground motion. However, spatial development and propagation of the shear zone would be influenced by different ratios of strike-slip to dip-slip by oblique-slip faulting. Therefore, further study on deformation behavior of soil near the ground surface due to faulting, and on its effects on engineering structures within the influenced zone is necessary.

Recently, according to domestic and foreign studies about disastrous earthquake inducing fault movement and surface rupture, the soil deformation induced by faulting are influenced by three factors, fault dip, S/H (slip measurement/ height of covering soil) and properties of soil materials. After referring to both domestic and foreign examples associated with surface-deformation influence range covering the scales from meter to kilometer, we can analyze the thickness of soil with drilling data to normalize the surface-deformation influence range in these examples. The result of the analysis can be quantified and then applied in designing a physical testing model.

Sandbox models are used to study the morphology and lineament of overlying soil deformation along the two sides of the fault plane, and influential region and slope directions by the oblique-slip faulting. To simplify the sandbox models, the dip angle of 90° of the fault plane was set and in cohesive sand was used as soil. Eight tests, with parameters of different rake angles, slip ratios of the bedrock, and thickness of the overlying soil, were designed.

The results show that hill-and-dale topography forms at the slip ratio of 0.15. Such topography did not change much if the faulting continued. When the slip ratio is 0.2, the angle between the lineament of the surficial ruptures and projection of the fault plane increased to a peak value of $\pm 40^\circ$ and then declined. The pure strike-slip faulting led to the maximum effect region, and the region appeared symmetrically on both sides of the projection of the fault plane, being about same amount as the thickness of the overlying soil. When the faulting had a dip-slip component, the effect region appeared

as a skewness pattern, moving to the subsidence side. When both the strike-slip and dip-slip occurred, the effect region was smaller than that derived from the pure strike-slip model, being about a half of the thickness of the overlying soil.

Due to the faulting, the various slope directions appeared from the initial flat ground surface being compressed and stretched. The azimuth of the dip direction was mainly affected by the dip-slip, with a ratio $> 40\%$ for the area of the dominant slope directions, which can indicate the fault lineament. By regressing, the relationship between the rake angle of the fault and the area ratio of the dominant slope directions was a quadratic polynomial. Based on the function, the rake angle of the fault can be inferred by the slope directions. The propagation of the fault tip in a cross-section direction in the models revealed that the angle of the fault plane was steeper when the fault tip became upward; when the fault tip propagated close to the ground, the angle of the fault plane became gentle, showing that the topographical height difference forced the fault plane to propagate to the lower regions.

After matching the result of our sandbox test and the field data of the earthquake event occurred in Kumamoto Japan, 2016, we can deduce that the fault mainly slips along the strike direction, and further suggest possible methods to mitigate seismic hazards around the fault fracture trace in next earthquake event.

Through observation and quantitative analyses by using the simplified models in this study, rupture development within the overlying soil derived from the oblique-slip faulting can be inferred. Potential positions and future development of the rupture exposures can also be deduced, and also can contribute retaining and protections from disasters of deformation of the overlying soil resulting from oblique-slip faulting.

Keywords: oblique slip faulting; near ground deformation; sandbox experiment; DTM

目錄



口試委員會審定書	I
誌謝.....	II
中文摘要.....	III
英文摘要.....	V
目錄.....	VII
圖目錄.....	IX
表目錄.....	XII
第 1 章 緒論	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	3
1.3 研究方法及流程.....	4
1.4 研究內容.....	4
第 2 章 文獻回顧	6
2.1 斜移/橫移斷層案例	6
2.2 物理模型試驗.....	10
第 3 章 研究方法	25
3.1 砂箱模型.....	25
3.2 砂箱實驗材料性質.....	29
3.3 砂箱實驗方法及過程.....	29
3.4 研究規劃與觀察項目	30
3.5 研究相關名詞定義.....	31

第 4 章	現地踏勘	39
4.1	布田川-日奈久斷層	39
4.2	斷層特性彙整.....	49
第 5 章	砂箱試驗成果	52
5.1	重複性試驗.....	55
5.2	地貌分布.....	59
5.3	地表線形.....	66
5.4	地表影響範圍.....	72
5.5	坡向分析.....	76
5.6	土中斷層面分布及隨深度的變化	82
5.7	覆土厚之影響.....	86
第 6 章	現地案例與砂箱試驗對比	87
6.1	剖面比對.....	87
6.2	地表破裂跡及下一期事件可能之地表破裂區域	87
6.3	上覆土層厚度推估.....	88
6.4	位移場分析.....	88
第 7 章	討論	103
第 8 章	結論與建議	106
8.1	結論.....	106
8.2	建議.....	108
參考文獻.....		109
附錄 A	砂箱試驗地表成果圖	113



圖目錄



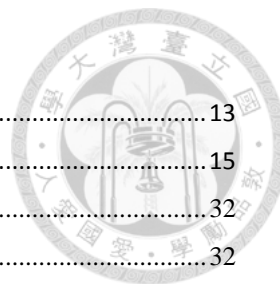
圖 1.1 本研究之流程圖.....	5
圖 2.1 臺灣活動斷層分布圖 2012(中央地質調查所 HTTP://FAULT.MOEACGS.GOV.TW/TAIWANFAULTS_2009/PAGECONTENT.ASPX?TYPE=C&ID=5)....	16
圖 2.2 新化斷層槽溝開挖剖面，可觀察出近地表陷落的負花狀構造(林啟文 ET AL. 2007).....	17
圖 2.3 歷史地震同震地表破裂範圍，顯示地表破裂於上盤範圍較大，下盤範圍較小，又以正斷層陷落型態的上盤影響範圍最廣(林銘郎 ET AL. 2014).....	17
圖 2.4 紐西蘭南島的 DARFIELD 地震的地表破裂跡位移統計，藉以分析地表影響帶寬 (HORNBLow ET AL. 2014).....	18
圖 2.5 巴基斯坦 2013 年地震之地表破裂範圍討論，採用遙測技術紀錄地表破裂跡，並進行斷層近域(ON-FAULT)與斷層遠域(OFF-FAULT)位移量值統計分析(KANEDA ET AL. 2008).....	19
圖 2.6 紐西蘭的 HOPE 斷層之地表破裂(KHAJAVI ET AL. 2014).....	20
圖 2.7 紐西蘭的 HOPE 斷層之斷層變形帶(FDZ)與覆土層厚度關係，透過資料統計可知上覆土層越厚，則斷層變形帶越寬(KHAJAVI ET AL. 2014).....	20
圖 2.8 砂箱試驗中乾砂受橫移斷層錯動的演化，其中雁型排列的地表破裂跡可稱為雷氏剪裂(RIEDEL SHEARS)(NAYLOR ET AL. 1986).....	21
圖 2.9 俯視圖可觀察的地表變形特徵，包括雷氏剪裂與褶皺的排列方向(DOOLEY & SCHREURS 2012).....	21
圖 2.10 基盤斷層變位伴隨第四紀地層和表面變形之砂箱試驗成果(上田圭一 & 谷和夫 1999).....	22
圖 2.11 側視圖可觀察的地層變形特徵，其中(A,B)背斜形式稱為正花狀構造(POSITIVE FLOWER STRUCTURE)，(C,D)向斜形式稱為負花狀構造(NEGATIVE FLOWER STRUCTURE)(LE GUERROUÉ & COBBOLD 2006).....	23
圖 2.12 橫移斷層系統在剖面下的特徵，對同一斷層而言，斷層的傾斜方向在不同的剖面上可能改變，且深度改變其運動方向與距離也不盡相同(CHRISTIE-BLICK & BIDDLE 1985).....	24
圖 3.1 斜移斷層砂箱試驗模型、座標及參數，其中 Y 方向為斷層面延伸方向.....	27
圖 3.2 砂箱模型照片，試驗區域尺寸為 100 CM(長)×30 CM(寬)×10 CM(高)，高度則視所鋪設砂層厚度而定.....	28
圖 3.3 試驗用砂之粒徑分佈圖.....	33
圖 3.4 砂箱模型已知座標點空間分布，使用於影像為基礎的地形三維重建.....	33
圖 3.5 斜移斷層砂箱試驗模型，滑移角 90 度的模型 4 正射影像、數值高程、坡向圖、坡度圖、粗糙度圖及日照陰影圖.....	34
圖 3.6 斜移斷層砂箱試驗模型，滑移角 135 度的模型 3 正射影像、數值高程、坡向圖、坡度圖、粗糙度圖及日照陰影圖.....	35
圖 3.7 斜移斷層砂箱試驗模型，滑移角 180 度的模型 1 正射影像、數值高程、坡向圖、坡度圖、粗糙度圖及日照陰影圖.....	36
圖 3.8 砂箱試驗討論課題及分析圖資，利用數值高程分析砂體垂直位移值並使用分析軟體產製陰影圖、坡度圖、坡向圖，協助地表破裂跡與擴展路徑之紀錄，數化基盤滑移過程中，地表砂土斷層尖端擴展、擴展路徑及最後地表變形之形貌；透過正射影像了解地表砂體水平	

位移量值；利用剖面照片，繪製土中斷層面及利用線性回歸求取土中最大影響範圍	37
圖 3.9 砂箱相關名詞示意圖，圖中黃色面代表土層中斷層尖端擴展路徑； W 代表斷層尖端擴展到地表之水平距離； H 代表上覆土層厚度； A 代表斷層基盤傾角及 S 代表基盤之滑移量，亦可根據三方向分為 S_x 、 S_y 、 S_z 。其中 W/H 表定義為斷層擴展距離比； S/H 定義基盤滑移比。	38
圖 4.1 布田川・日奈久斷層帶活斷層位置，本次主震活動斷層之布田川斷層，此次地震深度均在 10~12 公里之間，斷層滑移類型為右移兼具正斷層(地震調查研究推進本部 (2013))	42
圖 4.2 現地踏勘停駐點，時間為 2016 年 7 月 30 日，距離地震事件約 3 個月，地點分別為下陣(下陳)(A)、堂園(B)及黑川(C)地區之農地	43
圖 4.3 熊本都市圈活斷層圖，圖中為前震及主震位置，另 A 為下陣地區 B 為堂園地區(改繪自池田安隆 ETAL. (2001))	44
圖 4.4 現地及地表破裂位置與變位量，A 為下陣地區 B 為堂園地區，S1-S5 表示地表破裂跡 ..	45
圖 4.5 現地踏勘下陣(下陳)(A)，斷層於此區水平錯移約 1.3~1 公尺	46
圖 4.6 現地踏勘-堂園(B)，斷層於此區水平錯移約 2 公尺	47
圖 4.7 現地踏勘-黑川(C)，斷層於此區水平錯移約 0.9 公尺	48
圖 4.8 歷史地震斷層彙整資料 (A.歷史地震斷層地表破裂長度與最大位移量 B.歷史地震斷層地表破裂長度與地震矩規模)	51
圖 4.9 歷史事件滑移量分布圖	51
圖 5.1 模型規劃	52
圖 5.2 各階段試驗代號	53
圖 5.3 地表指準層方法學	56
圖 5.4 模型 1 影響範圍討論	57
圖 5.5 模型 2 影響範圍討論	57
圖 5.6 重複性試驗影響範圍	58
圖 5.7 走向滑移(M1)地形演育	62
圖 5.8 走向滑移(M1)等高線圖	62
圖 5.9 斜向滑移(M3)地形演育	63
圖 5.10 走向滑移(M3)等高線圖	63
圖 5.11 傾向滑移(M4)地形演育	64
圖 5.12 走向滑移(M4)等高線圖	64
圖 5.13 平移斷層砂箱模擬地表高程討論	65
圖 5.14 模型 1 地表線形	68
圖 5.15 模型 3 地表線形	69
圖 5.16 模型 4 地表線形	70
圖 5.17 地表線形角度與滑移比關係	71
圖 5.18 地表線形長度與滑移比關係	71
圖 5.19 模型 4 影響範圍討論	73
圖 5.20 模型 3 影響範圍討論	74

圖 5.21 統計分析結果	75
圖 5.22 影響範圍結果	75
圖 5.23 坡向區間表示	78
圖 5.24 滑移坡向分布	79
圖 5.25 滑移坡向面積比	79
圖 5.26 綜合地形坡向面積比	80
圖 5.27 綜合地形坡向累積面積比玫瑰圖	80
圖 5.28 綜合地形坡向累積面積比	81
圖 5.29 優勢坡向推估斷層滑移角	81
圖 5.30 砂箱模型剖面及描繪方式	83
圖 5.31 走向滑移砂箱模型(M1)剖面及描繪圖	83
圖 5.32 斜移砂箱模型(M3)剖面及描繪圖	84
圖 5.33 傾向滑移砂箱模型(M4)剖面及描繪圖	84
圖 5.34 剖面分析	85
圖 5.35 地表影響帶寬與滑移比關係	86
圖 6.1 布田川斷層槽溝及露頭點	91
圖 6.2 益城町鄰近地質圖及觀察點位置	92
圖 6.3 現地地表破裂跡與砂箱模型比較	93
圖 6.4 對比現地地表破裂跡相對錯位範圍	94
圖 6.5 模型 1 地表破裂跡錯位量(Y_{M1})計算位置	95
圖 6.6 調查區赤色立體地圖	96
圖 6.7 PIV 分析參數示意	97
圖 6.8 調查點 A 位移(上)及位移場(下)分布	98
圖 6.9 調查點 B 位移(上)及位移場(下)分布	99
圖 6.10 擬合事件各階段之砂箱模型	100
圖 6.11 擬合事件砂箱之質點影像分析	101
圖 6.12 推估下次事件砂箱之質點影像分析	102
圖 7.1 走向滑移模型示意圖	104
圖 7.2 傾向滑移模型示意圖	104
圖 7.3 斜向滑移模型示意圖	105

表目錄

表 2.1 台灣活動斷層參數資料表(陳文山，2010).....	13
表 2.2 部分國外平移及斜移斷層砂箱試驗之比較.....	15
表 3.1 本試驗用砂之基本物理性質.....	32
表 3.2 砂箱尺寸及記錄方法比較.....	32
表 4.1 2016 年 7 月 30 日野外照片資料.....	41
表 4.2 歷史地震斷層資料整理.....	50
表 5.1 試驗規劃表.....	54
表 6.1 地表破裂跡比較表.....	90
表 6.2 地表破裂跡錯移量推估上覆土層厚度.....	90
表 6.3 PIV 參數說明.....	90



第1章 緒論



1.1 研究動機

活動斷層是一種過去近期曾活動，並且可能在不久的將來再次發生錯動的斷層，一條活躍的斷層必定有地形上的表現。由斷層活動時引發地表的破壞、變形行為及變形範圍與斷層類型、傾角及兩側地層特性、厚度有密切的關係，但是對於斷層再活動時，其對基盤以上之**土層變形**(包括近地表之岩層與近代堆積物)、**地表破裂**將造成何種影響與範圍之資訊仍欠缺，故對於斷層活動與地震防災而言仍有不足。

臺灣由於位在環太平洋地震帶上，有感地震頻繁，歷史上的災害性地震除了散發地震波外，也同時伴生地表的震動、錯移及變形而形成災害。針對 20 世紀所發生的災害性地震與活動斷層間之關係，根據地調所 2012 年出版之臺灣活動斷層分布圖及地震地質與地變動潛勢分析計畫及重要活動斷層構造特性調查的研究成果，目前共有 33 條活動斷層，其中有 21 條是第一類活動斷層。此 21 條第一類活動斷層中，有 9 條是在 1900-1999 年間伴隨著災害性地震之發生，於地震時產生破裂之地震斷層，包括 1906 年梅山地震的梅山斷層(斷層編號 14)、1935 年新竹-台中地震的獅潭斷層(斷層編號 5)、屯子腳斷層(斷層編號 9)、1946 年新化地震的新化斷層(斷層編號 19)、1951 年的花東縱谷地震的米崙斷層(斷層編號 26)、瑞穗斷層(斷層編號 28)、玉里斷層(斷層編號 30)與最近的 1999 年集集地震的車籠埔斷層(斷層編號 11)、大尖山斷層(斷層編號 15)等，9 條斷層中有 7 條斷層含有斜移分量，故斜移斷層之相關研究極具重要性與迫切性。

此外，公告之 7 條斜移斷層中有 5 條活動性質被歸類為第一類活動斷層(過去一萬年內有活動紀錄)，當中多達 4 條斷層之地表破裂跡被掩蓋而不易被觀察，[Lin & Nishikawa \(2011\)](#) 指出通常在未固結沖積層厚的地方，破裂帶相對較寬；在未固結沖積層薄或缺乏的地方，破裂帶相對較窄。再者，出現在未固結沖積層厚的破裂



帶同常由數道個別的破裂帶所組成，各道的寬度，較僅會出現一道的沖積層薄的破裂帶要也寬許多，且數道個別的破裂帶的跨距為個別的 3-10 倍寬。

斷層運動時地層隨斷層面走向方向及傾向方向的運動，如果僅在傾向方向運動，則為傾向滑移斷層(dip-slip fault)如：正、逆斷層；而僅在走向方向運動，則為走向滑移斷層(strike-slip fault)，若包含兩個方向滑移，稱之為斜移斷層(oblique-slip fault)。前人文獻已針對正、逆斷層引致上覆土層變形等相關研究進行探討(Lin et al. (2006); Lin et al. (2007); Chu et al. (2013))，結果顯示破裂跡及剪裂帶發展受控於斷層傾角、斷層傾向滑移比及上覆土層材料性質等參數影響，但多數案例研究顯示斷層運動之滑移量皆包含走向及傾向方向運動，且走向方向滑移引致上覆土層變形會產生螺旋狀破裂跡(Ueta et al. (2000))，故走向及傾向滑移量比亦會影響破裂跡及剪裂帶發展，導致土體內破裂面發展交錯，且地表破裂形貌複雜，故本研究探討此類斷層運動時採用地表俯視與剖面側視等不同觀察面，藉以瞭解三維分布特徵。

目前國內外對於斜移斷層引致地表土層變形及地表破裂形貌，主要著重於現地調查紀錄(Tani et al. (1997); Hornblow et al. (2014))，透過航空照片記錄地震事件後的地表破裂，但易忽略地表未破裂或起伏較不顯著區域，另有部分學者透過室內物理模型試驗相關研究探討地表形貌，但多以手繪示意圖表示及討論(Emmons (1969); 上田圭一 & 谷和夫 (1999); Zwaan et al. (2016))，根據前人砂箱試驗結果，在俯視圖最顯著的橫移斷層特徵為：雁型排列(en echelon array)的地表破裂跡、褶皺、正斷層與逆斷層，其中雁型排列的地表破裂跡可稱為雷氏剪裂(Riedel shears)，Naylor et al. (1986)在砂箱試驗中探討乾砂受橫移斷層錯動的演化以及 Dooley & Schreurs (2012)整理顯示，地表變形特徵中雷氏剪裂與褶皺的排列方向，皆可瞭解俯視圖上的地表特徵。

因此斷層沿線地形、斷層錯動歷程地貌細部特徵變化、破裂跡發展順序及遷移的行為、斷層帶影響範圍等，是探討斷層引致上覆土層變形至地表的重點觀察項目，

而過去鮮少透過建立數值地形高程完整記錄，因此本研究併用現地調查資料彙整及自行設計物理模型實驗(砂箱實驗)，並用數位影像建立高精度數值地形模型之方法，透過本研究之簡化模型進行基本行為觀察及定量分析，探討斜移斷層上覆土層受到基盤滑移比及上覆土層厚度等因素影響，亦可協助推測斷層破裂跡於上覆土層中發展情形，有助於判斷破裂跡可能出露位置，以及未來發展情形，提供斜移斷層引致上覆土層變形之未來災害防治的重要貢獻。

1.2 研究目的

本研究期望探討走向與傾向滑移量對斷層作用引致上覆土層變形行為，包含斷層沿線地形、斷層錯動歷程地貌細部特徵變化、破裂跡發展順序及遷移的行為、斷層帶影響範圍等。

因此本研究之目的，將區分為：(1)藉由國內外活動斷層進行資料收集，以了解覆土厚度調查及地震事件後地形特徵。(2)根據室內砂箱試驗結果探討滑移分量比對覆土層變形特徵影響之行為，及地表地貌分析，其分述如下：

1. 藉由國內外活動斷層進行資料收集，以了解覆土厚度調查及地震事件後地形特徵。

其主要重點：

- (1) 地震斷層引致地表變形之地形特徵；
- (2) 斷層滑移分量比彙整

2. 根據室內砂箱試驗結果探討滑移分量比對覆土層變形特徵影響之行為，及地表地貌分析。

- (1) 上覆土層中斷層面與地表地形形貌之分析，包含基盤滑移量比(S/H)及滑移角等因素之影響；
- (2) 上覆土層中斷層面擴展、擴展路徑與地表地形形貌之現象；



1.3 研究方法及流程

本研究使用方法可分為現地調查及物理模型試驗，茲分述如下，研究流程如圖

1.1 所示：

(1) 現地調查方面：現地調查資料除可提供物理模型試驗，簡化所需之資訊外，更可作為物理模型試驗分析成果之驗證。

(2) 物理模型試驗方面：現地實驗是最直接可靠之方法，但其昂貴且參數控制困難。

因此小尺度模型試驗，可提供斷層作用上覆土層變形之基本行為，亦可應用於現地調查，惟必須考慮尺度效應之影響。

1.4 研究內容

本研究主要內容，可分述如下：

1. 觀察及蒐集現地調查資料有關斷層錯動引致上覆土層變形行為。並以簡化之砂箱物理模型試驗進行模擬，以探討上覆土層之基本行為，包含破裂跡發展及遷移；影響參數包含基盤滑移比、滑移角等。
2. 利用砂箱試驗結果與現地調查比對，驗證砂箱試驗方法之可行性，並可測定簡化參數及邊界條件等之合理參數。
3. 反算現地斷層特性及地表影響範圍討論

因此本文第一章為緒論，包含研究動機、目的及內容；第二章為文獻回顧；第三章為研究方法；第四章為現地踏勘；第五章為砂箱試驗成果，包括不同斷層滑移比模型及地形地貌討論；第六章為現地案例與砂箱試驗對比分析成果；第七章為結論與建議。

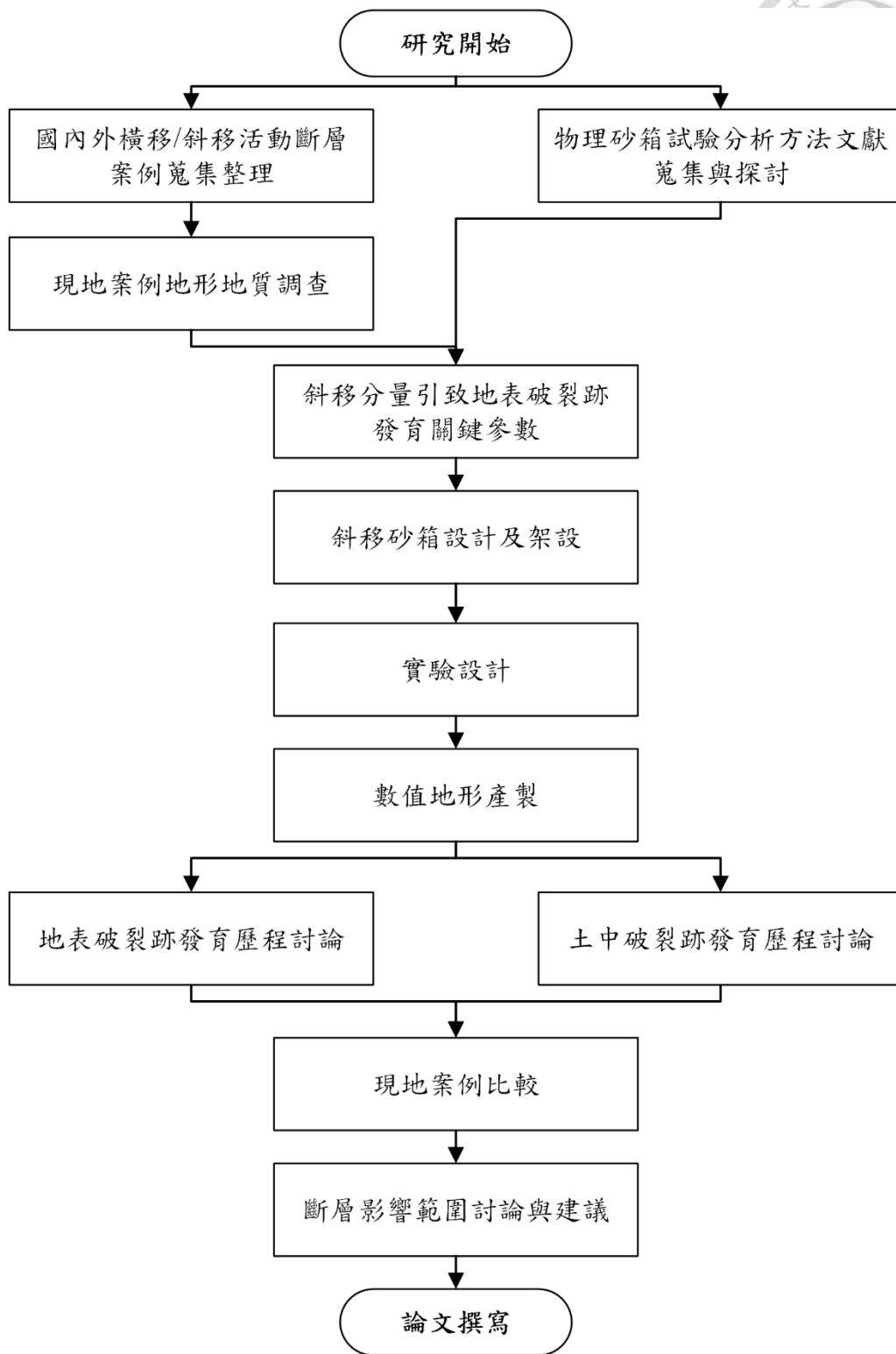


圖 1.1 本研究之流程圖

第2章 文獻回顧



因為斜移斷層研究較少，故一併蒐集橫移斷層研究進行討論，研究領域包括：國內外橫移/斜移斷層案例、物理砂箱試驗分析方法，進行整理並說明。

2.1 斜移/橫移斷層案例

2.1.1 國內案例

根據地調所 2012 年出版之臺灣活動斷層分布圖(圖 2.1)及地震地質與地變動潛勢分析計畫及重要活動斷層構造特性調查的研究成果(表 2.1)，臺灣北部 8 條斷層，中部 8 條斷層，西南部 9 條斷層，東部 8 條斷層；其中屬於第一類 20 條，第二類 13 條，共 33 條活動斷層。此 20 條第一類活動斷層中，有 7 條是在 1900-1999 年間伴隨著災害性地震之發生，於地震時產生破裂之地震斷層，包括 1906 年梅山地震的梅山斷層(斷層編號 14)、1935 年新竹-台中地震的獅潭斷層(斷層編號 5)、屯子腳斷層(斷層編號 9)、1946 年新化地震的新化斷層(斷層編號 19)、1951 年的花東縱谷地震的米崙斷層(斷層編號 26)與最近的 1999 年集集地震的車籠埔斷層(斷層編號 11)、大尖山斷層(斷層編號 15)等，其中有 5 條斷層含有斜移分量，故在斜移斷層之相關研究極具重要性與迫切性。

國內的活動橫移斷層中，根據地質調查所的調查報告，單純僅具走向錯移性質的斷層有：右移的屯子腳斷層、梅山斷層、新化斷層及左移的左鎮斷層，以走向錯移為主兼具逆移的有米崙斷層、嶺頂斷層、玉里斷層及池上斷層，而以逆移為主兼具走向錯移的有新竹斷層、大尖山斷層、六甲斷層及瑞穗斷層，在 33 條的活動斷層中，共有這 12 條具走向錯移性質。目前看來東部的這幾條斷層，包括米崙斷層、嶺頂斷層、瑞穗斷層、玉里斷層及池上斷層，其深部可能為相連的斷層帶，亦即分隔菲律賓海板塊和歐亞板塊的縫合構造(suture)，若根據 [Sylvester\(1988\)](#)的分類，這應屬於板塊邊界轉形斷層，而在地表的這些斷層跡，應為轉形斷層在簡單剪力(simple shear)作用搭配聚合(convergence)的效應下，所形成的類似棕櫚樹的構造




(palm tree structure)。西部的這些斷層根據 [Sylvester \(1988\)](#) 的分類，應屬板塊內橫衝斷層，特別是右移的屯子腳斷層、梅山斷層、新化斷層及左移的左鎮斷層，其走向與大地應力的關係，極類似為 [Sylvester \(1988\)](#) 提出的純剪力(pure shear)作用下，所可能產生的共軛斷層之其中一支。[林啟文 et al. \(2007\)](#) 指出，梅山斷層在近地表處呈現帶狀分布，其位態接近垂直地表，長度接近 13km，垂直位移高達 170~330 m，地表下構成的破裂帶寬度可達 450 m。另外，新化斷層長度為 6 km，其位態也是接近垂直地表，開挖的槽溝中，出現在具有正移分量的橫移斷層常可以看到的花狀構造(圖 2.2)。[林啟文 et al. \(2008\)](#) 指出，屯子腳斷層長度為 14 km，由地球物理探測結果，淺部斷層帶寬約數百公尺，呈現花狀構造。

1999 年 9 月 21 日發生於台灣中部的集集地震，地震矩規模 $M_w = 7.6$ ，造成地表破裂長約 100 公里，包括南段大致上呈南北走向的 80 公里及北段呈東北東走向約 20 公里的破裂。南段的地表破裂在大部份區域以變形帶(deformation zone)形式出現，變形帶的西側為一高差顯著的地震斷層崖或撓曲崖，此地形崖通常為此次地震斷層切出地表或下伏的位置，若以其為依據變形帶的寬度極不對稱，上盤的變形帶寬遠大下盤，北段也有類似的現象，若整體的構造形式更顯複雜些。根據目前收集到的精細大比例尺的地震變形帶圖(e.g. [Kelson et al. \(2001\)](#); [Huang & Johnson \(2010\)](#))，推估地表破裂帶寬約 50~350 公尺，上盤變形帶寬約 42~322 公尺，下盤約 8~28 公尺。

2.1.2 國外案例

1999 年的集集地震及同年的兩次規模七級以上的土耳其地震，讓世人對同震斷層引致地表變形的觀念，有顯著的改變。不再僅專注在地表斷層錯動量最大的斷層跡或顯著的斷層(撓曲)崖上，同時也開始記錄斷層地表跡兩側的次要破裂及變形情形，也開始利用較精密的測量儀器，定量化地觀察，進而判釋地震斷層錯動的影響範圍。



1999 年 10 月 16 日美國加州的 Hector Mine 地震，地震矩規模 $M_w = 7.1$ ，造成右移的地表破裂，由斷斷續續的斷層跡及破裂所組成，總長達 48 公里，最大錯移量 5.25 ± 0.85 公尺，由 [Treiman et al. \(2002\)](#) 報導的同震地表破裂圖，推估地表破裂帶寬約 10~500 公尺，50 公尺寬最常見。


2000 年 7 月 17 日及 21 日冰島南部，發生兩起地震，芮式規模皆為 $M_s = 6.8$ 。7 月 17 日的地震，造成一系列北北東向，左階式(left-stepping)的破裂地表跡；7 月 21 日地震的同震破裂較無規章，基本上為斷斷續續的破裂所組成。由 [Clifton & Einarsson \(2005\)](#) 報導的同震地表破裂跡圖，推估地表破裂帶寬約 2~50 公尺，25 公尺寬最常見。

2001 年 11 月 14 日中國崑崙山(Kunlunshan)地震，地震矩規模 $M_w = 7.8$ ，沿崑崙山斷層最西段破裂，長達 426 公里，同震左移的水平最大錯移量為 7.6 ± 0.4 公尺，破裂帶寬，隨處不同，數公尺至數公里寬，最寬可達 8 公里([Xu et al. \(2006\)](#))。

2005 年 10 月 8 日發生於巴基斯坦的 Kashmir 地震，地震矩規模 $M_w = 7.6$ ，造成地表破裂長約 70 公里，垂直的錯距(vertical separation)達 7 公尺，根據 [Kaneda et al. \(2008\)](#) 的報導，該地震斷層引致的地表破裂帶中之變形，極似集集地震變形帶，具一高差顯著的地震斷層崖或撓曲崖，由該團隊量測的地變後的變形帶地表剖面，推估寬約 38.5~47.8 公尺，上盤的變形帶寬 27.2~41.9 公尺，下盤為 5.9~11.3 公尺。

2008 年 5 月 12 日發生於中國的汶川地震，地震矩規模 $M_w = 7.9$ ，造成相對前兩個地震為複雜的地表破裂，主要沿龍門山斷裂帶中的兩條逆衝斷層破裂，造成兩道分別為 240 公里及 72 公里的地表破裂帶([Wang et al. \(2010\)](#))。兩破裂帶中的變形類似前兩個地震，由 [Li et al. \(2010\)](#) 量測的地變後的變形帶地表剖面，推估寬約 6~31 公尺，上盤的變形帶寬 8.5~16 公尺，下盤為 1.5~5 公尺。

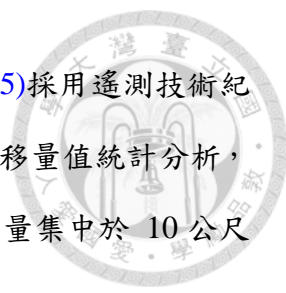
2009 年 4 月 6 日的義大利中部的 L'Aquila 地震，是相當有名的，7 名義大利



科學家因為沒有預測到 2009 年一起致命地震而被控殺人罪、面臨牢獄之災，引發全球譁然，還好此案於已於 2014 年 11 月 10 日獲得平反。這地震的地震矩規模不大($M_w = 6.3$)，地表的破裂是以裂縫(fractures)及裂隙(cracks)為主。但卻因為震央鄰近人口稠密處，造成的 308 人亡，67,000 人無家可歸。Boncio et al. (2012)即針對這次的同震地表破裂，加上 18 個正斷層歷史地震事件，認定正斷層同震破裂寬度與地震規模關係不大，透過統計資料分析，建議正斷層地震斷層帶(Earthquake Fault Zone, EFZ)，於斷層上盤 150 公尺寬及於下盤 30 公尺寬；斷層避離帶(Fault Avoidance Zone or Setback)，於斷層上盤 40 公尺及下盤 15 公尺，參見林銘郎 et al. (2014)彙整圖 2.3，地震強度越大，則地表影響範圍有越大的趨勢，但還是要考量地質構造，且上盤影響範圍比下盤大，需注意上下盤分界的定義，其中並將台灣地震資料納入。

2010 年 9 月 4 日發生於紐西蘭南島的 Darfield 地震，地震矩規模 $M_w = 7.1$ ，造成地表破裂長約 29.5 ± 0.5 公里，寬 30~300 公尺不等，最大水平位移 5.2 ± 0.2 公尺，最大垂直高差 1.45 ± 0.2 公尺，平均總位移 2.5 ± 0.1 公尺。Hornblow et al. (2014)統計地表破裂跡相對位移量，藉以分析地表影響帶寬，參見圖 2.4，Quigley et al. (2011)在地震發生後不久，立刻針對地表破裂進行精細的作圖，並根據該國環境部(Ministry for the Environment)的準則，劃定斷層地表跡兩側各 20 公尺的斷層避離帶(fault avoidance zone)，提供給政府在土地利用上的參考。

2011 年 4 月 11 日，在 Tohoku 超大地震($M_w = 9.0$)後的一個月，地震規模七級震源約為五公里的 Hamadori 地震發生在 Fukushima 縣的海岸地區。主震的斷層機制解指出此為正斷層作用所致。野外的調查發生同震地表破裂約有 11 公里長，且沿既存的 Shionohira 斷層跡(亦即 Itozawa 西斷層)，且 Yunotake 斷層及 Itozawa 東斷層也有同震地表破裂分佈。此地震為目前在 Tohoku 地震以來，日本陸上最大的地震，其發震的原因也因此被認為與 Tohoku 地震有密切關連。Lin et al. (2013)報導在 Shionohira 斷層及 Yunotake 斷層同震剪切帶寬可達約 5~50 公尺不等。



2013 年巴基斯坦俾路支省(Balochistan)地震，Gold et al. (2015)採用遙測技術紀錄地表破裂跡，並進行斷層近域(on-fault)與斷層遠域(off-fault)位移量值統計分析，結果顯示地震最廣影響範圍約 350 公尺(圖 2.5)，而 72%的位移量集中於 10 公尺內，而破裂跡密度較高區域，其相對位移量較小。

土層受斷層引致變形之因素，受控於斷層傾角、斷層傾向滑移比及上覆土層材料性質等參數影響(Lin et al. (2006); Lin et al. (2007); Chang et al. (2013))，透過國內外地震案例彙整其地表變形影響範圍可由公尺等級到公里等級，但案例資料並未記錄土層材料性質與厚度，而 Khajavi et al. (2014)研究中已經針對現地案例之土層厚度對地表影響範圍進行討論(圖 2.6)，透過資料統計可知上覆土層越厚，則斷層變形帶越寬(圖 2.7)，並對於不同土層材料性質有不同的關係式

地震正滑斷層與逆滑斷層的地表變形特性相似，常造成具高差的斷層崖或撓曲崖，延續頗佳，變形帶中除出現各式的破裂(如小斷層、雁形裂隙..)外，地表也呈現傾斜，或僅傾斜無破裂，變形的影響範圍，上盤總是比下盤寬許多(反向斷層不計入考量的情況下)。地震走移滑移斷層，常呈一道或數道平行的破裂，各道破裂常由雁形裂縫組成，其他的變形破壞現象，如張裂縫、壓力脊..等也常見，通常這些變形破壞現象斷斷續續出現，但整體的破裂的延續性仍頗佳。

無論那類型的地震斷層地表變形，其變形帶的寬度與上覆的土層厚度密切相關，越厚越寬，然既有文獻卻少有針對傾向滑移及走向滑移分量對上覆土層變形之影響進行探討，本研究將利用現地資料建立室內試驗雛形，並增列斷層滑移距離之影響因素，以了解下一期斷層滑移錯動對地表變形影響範圍。

2.2 物理模型試驗

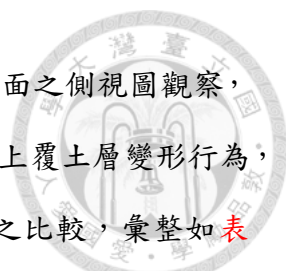
物理模型(physical model)已被地質學者廣泛應用於地質構造之研究，可以幫助了解地質構造現象的起源、發育過程及現象之間，相對應的空間排列關係，並可與鑽井岩心、斷層槽溝及地球物理震測等成果進行比較討論。

根據前人砂箱試驗結果，在俯視圖最顯著的橫移斷層特徵為：雁型排列(echelon array)的地表破裂跡、褶皺、正斷層與逆斷層，其中雁型排列的地表破裂跡可稱為雷氏剪裂(Riedel shears)，Naylor et al. (1986)在砂箱試驗中探討乾砂受橫移斷層錯動的演化(圖 2.8)，Lazarte & Bray (1996)由砂箱實驗探討平移斷層斷層作用時，對上覆黏土層剪切帶發展與對上方土堤之影響以及 Dooley & Schreurs (2012)整理顯示(圖 2.9)，地表變形特徵中雷氏剪裂與褶皺的排列方向，皆可瞭解俯視圖上的地表特徵。

上田圭一 & 谷和夫 (1999)探討覆土厚度對地表影響範圍，利用大型 90 度斷層砂箱試驗裝置，鋪設 10 公分及 40 公分覆土，左移 50 公分，地表影響範圍(W/H)皆為 2.35，顯示地表影響範圍與覆土厚度具高度相關。

在橫斷層剖面之側視圖中花狀構造為判釋橫移斷層的主要依據，受到不同應力擠壓，斷層破裂於沉積岩及基盤的界面上開始向地表分岔，而在變形帶內受到斷層錯動所形成的斷塊，呈現狹長的背斜形或向斜形式，Le Guerroué & Cobbold (2006)彙整地球物理資料中，可以從側視圖明顯看出地層斷塊形成的構造(圖 2.11)，其中背斜形式稱為正花狀構造(positive flower structure)如圖 2.11 (a.b)，向斜形式稱為負花狀構造(negative flower structure) 如圖 2.11 (c.d)，透過俯視及側視圖即可更加了解橫移斷層錯動時破裂跡在三度空間的變化，彙整前人之砂盒物理模型顯示，花狀構造之成因主要是因為雷氏剪裂在三度空間上具有螺旋狀之幾何型貌，當該破裂在地表呈現雁型排列時，側視圖即可見花狀構造，此外根據 Christie-Blick & Biddle (1985)，橫移斷層錯動導致覆土層的變化，在側視圖上有以下特性：

1. 就單一之剖面而言，不同的分叉斷層可能具有正斷層或逆斷層的離距(normal or reverse separation)。
2. 對同一分叉斷層在不同深度，有時具有正斷層或逆斷層的運動分量。
3. 對同一斷層而言，斷層的傾斜方向在不同的剖面上可能改變，且深度改變其運動方向與距離也不盡相同(圖 2.12)。



因此本研究之斜移斷層砂箱試驗，將透過俯視圖及橫斷層剖面之側視圖觀察，並進行滑移比、滑移角及上覆土層厚度等參數變化，以探討斷層上覆土層變形行為，優先討論參數於后節研究方法說明，與部分國外相似砂盒模型之比較，彙整如表 2.2。有鑑於斜移斷層影響參數眾多，本研究將簡化斜移斷層模型之參數，選定斷層傾角為 90 度，土層材料為無凝聚性砂土，採用室內砂箱試驗，瞭解滑移量變化對土層破裂跡與應變集中帶發育等三維分析，並探討地表破裂分佈之影響。

表 2.1 台灣活動斷層參數資料表(陳文山，2010)

斷層名稱	分類	長度 (km)	滑移特性	斷層傾角 (度/方向)	GPS 跨斷層水平速度變化 (mm/yr)		跨斷層垂直速度變化 (mm/yr)			短期滑移速率 (mm/yr)	長期滑移速率 (mm/yr)	再現週期 (yr)	最近一次活動時間 (yr)	可能最大地震規模 (M)
					平行斷層走向	垂直斷層走向	精密水準	GPS	地質證據					
1 山腳斷層(北)	二	22*	正移 a	>60/東 a	-0.6±5.2b	-1.2±6.2b	-2.2b	2.1±10.2b		2.2 v			<11,000a	(6.9)
(南)		13a			-1.3±5.8b	-5.0±7.4b	-10.8 b	2.3±12.3b	1.8c 1.2u					
2 湖口斷層	二	21*	逆移 a	~40/南 a	+0.2 ± 3.2b	4.1 ± 4.2b	-2.1 b	1.2 ± 7.8b	1.7±0.8				<70,000a	(6.6)
3 新竹斷層	二	10*	逆移兼右移 a	~45/南 a	+0.9 ± 2.5b	2.9 ± 2.6b	-2.3 b	0.9 ± 8.4b	~1				更新世晚期	(6.2)
4 新城斷層	一	29*	逆移 a	~30/南 a	+0.2 ± 3.0b	1.2 ± 2.5	-7.8 b	-0.3 ± 7.9b	~1a		0.7~1.6d 0.2~1.3⊙	2000d	<300 a	(6.8)
5 獅潭斷層	一	11*	逆移 e	>60/西 e	-0.7 ± 1.6b	0.9 ± 2.7b	-	2.1 ± 7.2b		1.3v			A.D.1935	7.1 (6.3)
6 三義斷層	一	34*	逆移 e	40-60/東 e	-0.2e	0.7e	-0.1e	-14.5e		20.3-34.5b			全新世?e	(6.8)
7 大甲斷層(北)	一	8e	逆移 e	40-50/東 e	+1.3 ± 2.9b	2.9 ± 3.1b	-2.0e	-4.1 ± 8.9b	1.7-5.5f 3.6±1.9			(552)b	全新世?e	(6.8)
(南)		23*		/東	+0.3 ± 2.6b	0.2 ± 1.8b	-3.1e	2.4 ± 8.4b						
8 鐵砧山斷層	一	13e	逆移 e	/西	+1.3 ± 2.9b	2.9 ± 3.1b	0.4e	-4.1 ± 8.9b					全新世?e	(6.4)
9 屯子腳斷層	一	14e	右移 e	高角度	-3.2e	1.5e	0.1e	4.0e		5.2-12.7b		(141)b	A.D.1935	7.1 (6.4)
10 彰化斷層	一	36e	逆移 e	/東	-0.9 ± 2.1b	3.5 ± 2.4b	6.3e	9.2 ± 4.1b	4.3-10.3f	2.0-6.8 v		(407)b	全新世?e	(6.9)
11 車籠埔斷層(北)	一	38e	逆移 e	~40/東 e	-3.6 ± 3.2b	4.1 ± 5.0b	4.1e	12.8 ± 9.2b	3.47o	6.6-24.9 v	~6.94o	200-700o (546)b	A.D.1999	7.3 (7.3)
(南)		38e		~40/東 e	-7.2 ± 7.1b	13.4 ± 8.2b	3.9e	3.4 ± 6.1b						
12 大茅埔-雙冬斷層	一	69e	逆移 e	~45/東 e	-3.0e	4.2e	4.1e	3.5e		8.7-47.8b		(2894)b	A.D.1999	(7.2)
13 九芎坑斷層	二	16*	逆移 g	20-30/東 g	+0.8 ± 2.6b	2.3 ± 3.9b	-15.3g	4.7 ± 8.9b		14.3-20.7b	0.7~0.9⊙	(199)b	<18,540g	(6.5)
14 梅山斷層	一	15*	右移 g	>60g	+1.6 ± 3.2b	0.9 ± 3.3b	-0.8g	5.8 ± 2.3b		5.3 v		(162)b	A.D.1906	7.1 (6.4)
15 大尖山斷層	一	29*	逆移兼右移 g	>60/東 g	-2.6 ± 3.9b	0.5 ± 3.8b	-11.6g	13.6 ± 10.7b					A.D.1999	(6.7)
16 木屐寮斷層	二	7g	逆移 g	/東 g	+2.0 ± 3.6b	2.3 ± 2.9b	-	9.3 ± 8.4b	5.6±2.0n 6.33±0.06o	15.1-22.9 v	12.7o 11.2±4.0f	(430)b	更新世晚期 g	(6.0)
17 六甲斷層	一	16*	逆移兼左移 g	~30/東 g	+2.0 ± 3.6b	2.3 ± 2.9b	0.3g	9.3 ± 8.4b	5.6±2.0n 6.33±0.06o	15.1-22.9 v	12.7o 11.2±4.0f	(430)b	<10,000g	(6.5)

斷層名稱	分類	長度 (km)	滑移特性	斷層傾角 (度/方向)	GPS 跨斷層水平速度變化 (mm/yr)		跨斷層垂直速度變化 (mm/yr)			短期滑移速率 (mm/yr)	長期滑移速率 (mm/yr)	再現週期 (yr)	最近一次活動時間 (yr)	可能最大地震規模 (M)
					平行斷層走向	垂直斷層走向	精密水準	GPS	地質證據					
18 觸口斷層	一	27*	逆移 g	50-60/東 g	+3.2 ± 4.2b	11.1 ± 3.4b	3.1g	3.8 ± 7.2b		5.3-16.7b		(1314)b	<10,000g	(6.8)
19 新化斷層	一	6g	右移 g	>60g	+8.8 ± 3.9b	1.6 ± 4.2b	-5.0g	3.2 ± 8.9b		11.4 v		(188)b	A.D.1946	6.1 (6.0)
20 後甲里斷層	二	12g	逆移 g	>35/西 g	+3.5 ± 2.8b	6.2 ± 3.8b	7.9g	-0.4 ± 7.6b	5-6g	5.2-9.5b	5.4~5.5⊙	(936)b	全新世晚期 g	(6.3)
21 左鎮斷層	二	13*	左移 g	>60/北 g	-1.4 ± 8.6b	6.3 ± 7.9b	-	4.1 ± 7.9b					更新世中晚期 g	(6.2)
22 小崗山斷層	二	8h	逆移 s	45/東 n	+3.6 ± 2.8b	8.6 ± 3.1		9.7 ± 8.9b	4.4±0.6n ≥3.3±1.1w	14.1-20.2b	≥5.7±1.4x	(867)b	更新世晚期 s	(6.1)
23 旗山斷層	一	26*	逆移 s	50/東 n	+4.2 ± 5.7b	5.4 ± 7.2b	-3.6b	-1.2 ± 13.4b		<5.0 v			距今 7700-8330 年前 s	(6.8)
24 潮州斷層	二	90*	逆移 s	70-80/東 n	-1.1 ± 3.4b	0.3 ± 1.8b	-3.6b	6.9 ± 8.4b		<5.0 v			更新世晚期 s	(7.3)
25 恆春斷層	二	16s	逆移 h	/東 n	-3.9 ± 3.9b	5.4 ± 4.4b	1.0b	-0.7 ± 6.2b	7.5±0.14o >4.1±0.1	42.1v			更新世晚期 s	(6.5)
26 米崙斷層	一	8s	左移兼逆移 s	/東 n	-8.4±5.7b	6.8±6.3bb	-17.9b	8.7±16.9b					A.D.1951	7.3 (6.1)
27 嶺頂斷層※	二	36*	左移兼逆移 s	/東 n	-8.4 ± 5.7b	6.8 ± 6.3b	-19.6b	8.7 ± 16.9b					更新世晚期	(6.8)
28 瑞穗斷層※	一	24*	逆移兼左移 s	40-60/東 s	-	-	-		12.5-16.0o		21.6-27.7o 24±2s 24.6~31.4⊙ 3.8~4.0⊙	170-210o 190±20s	A.D.1951	(6.8)
29 奇美斷層	二	23*	逆移 s	80/東 p	-6.5 ± 2.3b	4.1 ± 8.7b	3.9b	7.9 ± 10.1b					>2000o 更新世晚期 s	(6.8)
30 玉里斷層	一	23s	左移兼逆移 s	30/東 j	-14.5 ± 3.6b	5.6 ± 4.9b	-0.8b	13.2 ± 17.6b	12.5-16.0k		1.9~2.2⊙		A.D.1951	7.3 (6.7)
31 池上斷層	一	64*	左移兼逆移 s	67/東 o		17-19l	15-16.5m	12-28m	23.5-27n >8.3o		26-30n 15.6~17.0⊙	50-125n	A.D.2003o	6.6 (7.2)
32 鹿野斷層	一	18*	逆移 s	/東 n		13-15q		26r	~3o 5.5w 1.85w		5.4w	2100w	更新世晚期 s <1890-2110w	(6.5)
33 利吉斷層	二	25*	逆移 h	67/東 o	-20-30r	10-20r	2r		~3o		12.2~13.3⊙		更新世晚期 s	(6.5)

表 2.2 部分國外平移及斜移斷層砂箱試驗之比較

Author, years	Fault type	Method	Material	Direction of movement	Measurement	Remark
(Naylor, Mandl, & Supesteijn, 1986)	dextral-slip faults	sandbox/ embankments	sand (0.15-0.3 mm),clay	Horizontal(y)	Depict characteristics	Find agreement between the models and both mechanical theory and natural examples of wrench faulting
(KR McClay & White, 1995)	Extensional fault	sandbox/ level ground	quartz sand (275 μm)	Horizontal(x)	Depict characteristics Photography	The three-dimensional progressive development of orthogonal and oblique rift systems
(Ken McClay & Dooley, 1995)	dextral-slip faults two segment	sandbox/ level ground	sand (190 μm)	Horizontal(y)	Photography	Sandbox analogue models of pull-apart basins that developed in sedimentary strata
(Lazarte & Bray, 1996)	Sinistral-slip faults	Sandbox/ embankments	clay	Horizontal(y)	Depict characteristics Photography linear variable differential transformer(LVDT)	The effect of model geometry and base fault orientation are also in the model's response
(Le Guerroué & Cobbold, 2006)	dextral-slip faults	Sandbox/ level ground	sand (0.4-0.5 mm)	Horizontal(y)	Depict characteristics Photography	Influence of erosion and sedimentation on strike-slip fault systems
(Soto, Martinod, & Odonne, 2007)	Sinistral-slip faults	Sandbox/ level ground	sand	Horizontal (x & y)	Depict characteristics Photography	the influence of previous pure strike-slip and transpressional structures on subsequent perpendicular compression
(Toscani et al., 2009)	dextral-slip faults	Sandbox/ embankments	sand (100-300 μm)	Horizontal(y)	Depict characteristics Photography	Investigated quantitatively the propagation of a reactivated strike-slip fault through a sedimentary cover
(Schrack & Cruden, 2010)	Sinistral-slip faults	Sandbox/ level ground	sand (200 μm)	Horizontal(y)	Particle Imaging Velocimetry (PIV) CCD cameras make DTM	Compaction may be an important factor in the development of topography and fault network structure along strike-slip faults in sedimentary basins
(Mitra & Paul, 2011)	strike-slip faults / two segment	Sandbox/ level ground	clay	Horizontal(y)	Laser scanner	Geometry and evolution of structures and related secondary faults along releasing bends and offsets and restraining bends
This study	Sinistral-slip faults	Sandbox/ level ground	sand	Horizontal(y), Vertical(z)	Depict characteristics Photography Particle Imaging Velocimetry (PIV)(Fig.c) Laser scanner	Investigated quantitatively the propagation of shear zone width Width of a deformation zone is a function of all the parameters and is limited

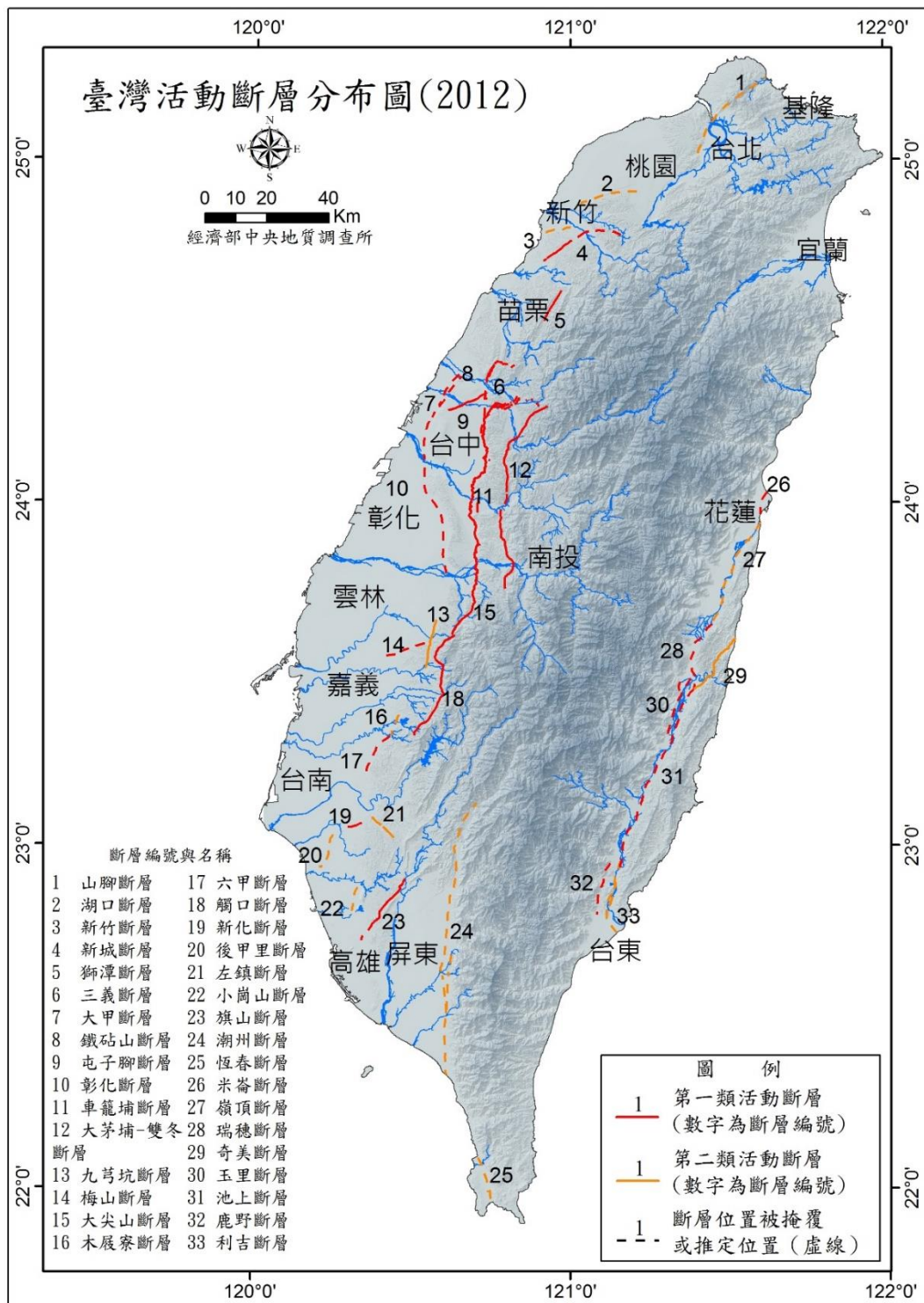


圖 2.1 臺灣活動斷層分布圖 2012(中央地質調查所)

http://fault.moeacgs.gov.tw/TaiwanFaults_2009/PageContent.aspx?type=C&id=5

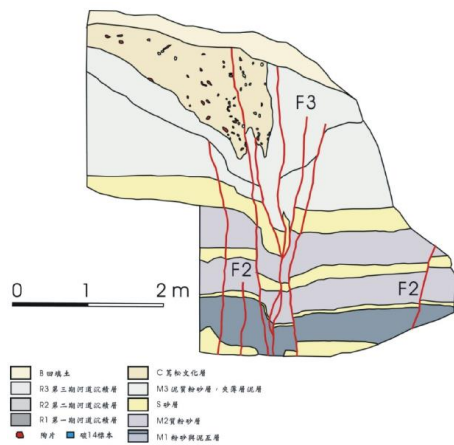
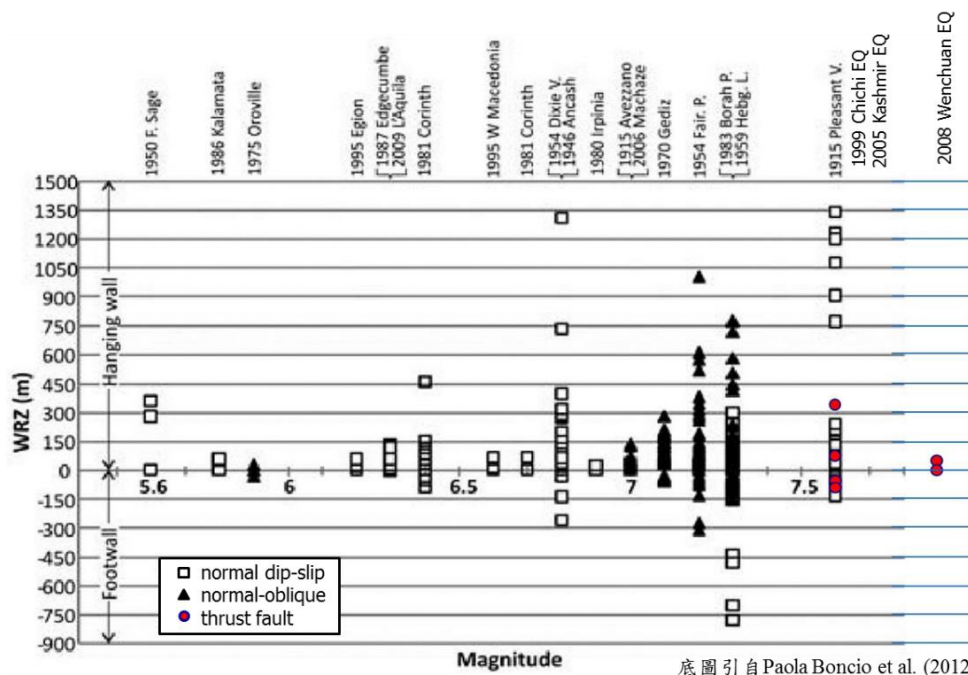
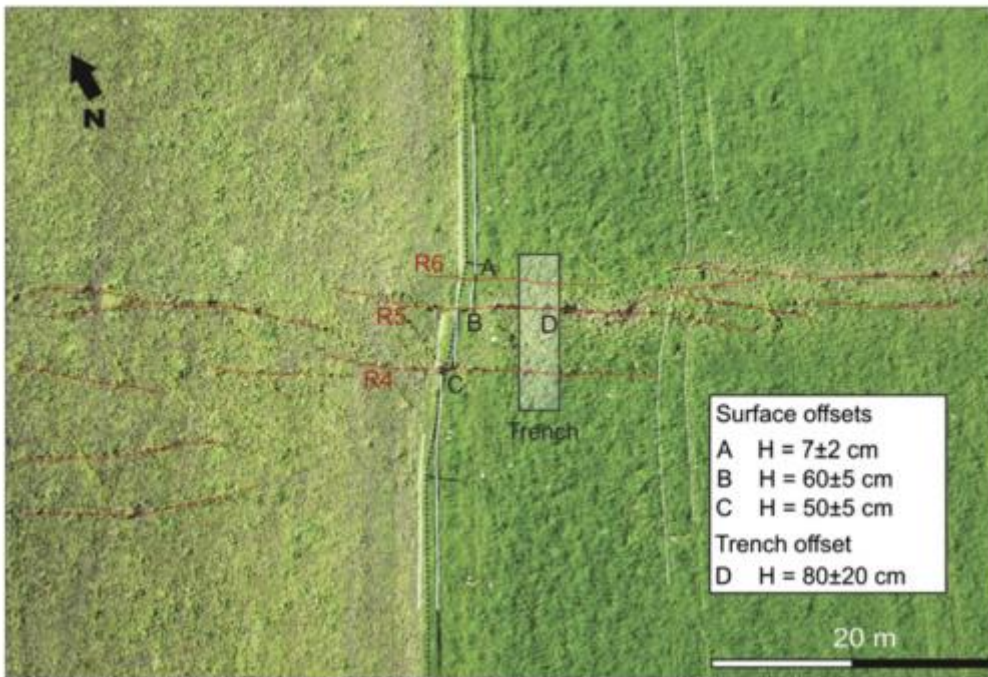


圖 2.2 新化斷層槽溝開挖剖面，可觀察出近地表陷落的負花狀構造(林啟文 et al. 2007)



底圖引自 Paola Boncio et al. (2012)

圖 2.3 歷史地震同震地表破裂範圍，顯示地表破裂於上盤範圍較大，下盤範圍較小，又以正斷層陷落型態的上盤影響範圍最廣(林銘郎 et al. 2014)



Cumulative Horizontal Displacement (HD) Clintons

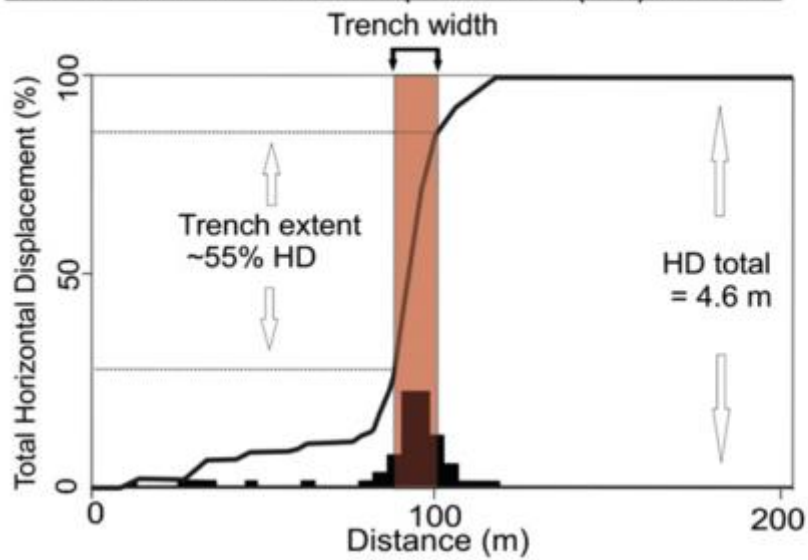


圖 2.4 紐西蘭南島的 Darfield 地震的地表破裂跡位移統計，藉以分析地表影響帶寬(Hornblow et al. 2014)

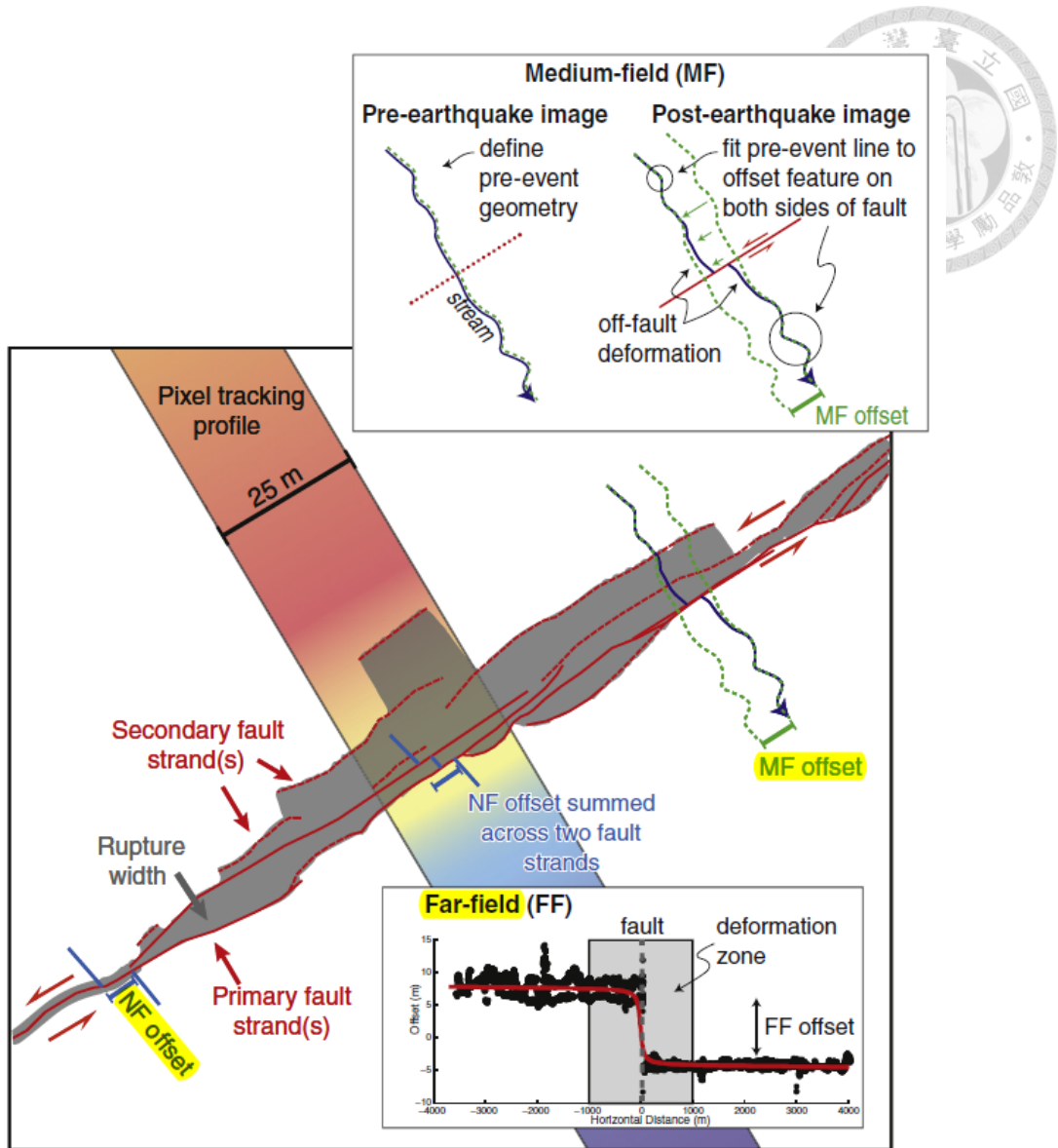
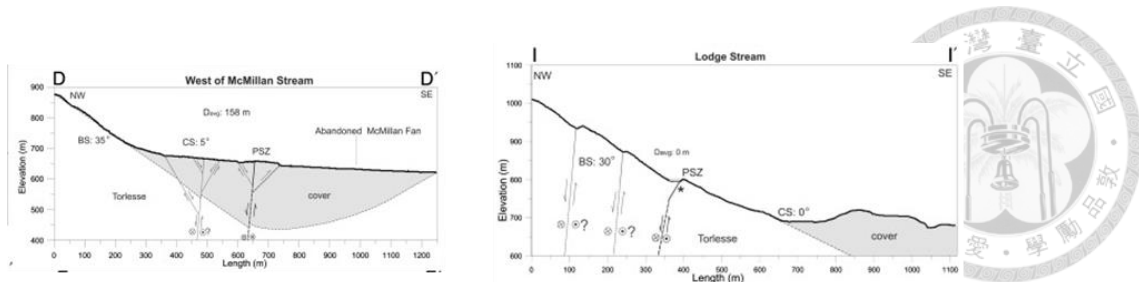


圖 2.5 巴基斯坦 2013 年地震之地表破裂範圍討論，採用遙測技術紀錄地表破裂跡，並進行斷層近域(on-fault)與斷層遠域(off-fault)位移量值統計分析(Kaneda et al. 2008)



Structural and morphological characteristics of the cross-sections.

Cross-sections and comments	Fault strike	Average depth of cover deposits under the PSZ	Fault density (no)	FDZ width	Slope
AA'-BB' Right step-over, 3° change in strike, situated in valley	74°	200	5	107 at the cross-section	<5°
CC' 10° fault bend, situated in valley	64°-74°	147	6	443	5°
DD' Left step-over, 8° change in strike, situated in valley	67	158	6	400	5°
EE' Situated at the mountain flank, near 2 large branches of McMillan Stream and some smaller tributaries	68	44	9	330	21°
FF' Situated at the mountain flank, oldest part of the landscape, nearly at the same distance to McMillan and Three Mile Stream (not very close to large streams)	71	75	2	83	12°
GG' Left step-over, 9° change in strike, situated at the mountain flank, near Three Mile Stream and its tributaries	73	70	8	434	15°
HH' Left step-over, 6° change in strike, situated at the mountain flank, not very close to Three Mile Stream and its tributaries	73	45	4	215	20°
II' Left step-over, 10° change in strike, situated at the mountain flank, near Lodge Stream	69	0	3	284	30°
JJ' Left step-over, 15° bend, en echelon structures, situated at the mountain flank, near Boundary Stream and Hope River	85	2357	11	420	8°
KK' En echelon structures, 5° change in strike of the main PSZ strands, situated at the mountain flank, at a greater distance to Boundary Stream (with respect to JJ') and near Hope River	72	235	9	254	8°

圖 2.6 紐西蘭的 Hope 斷層之地表破裂(Khajavi et al. 2014)

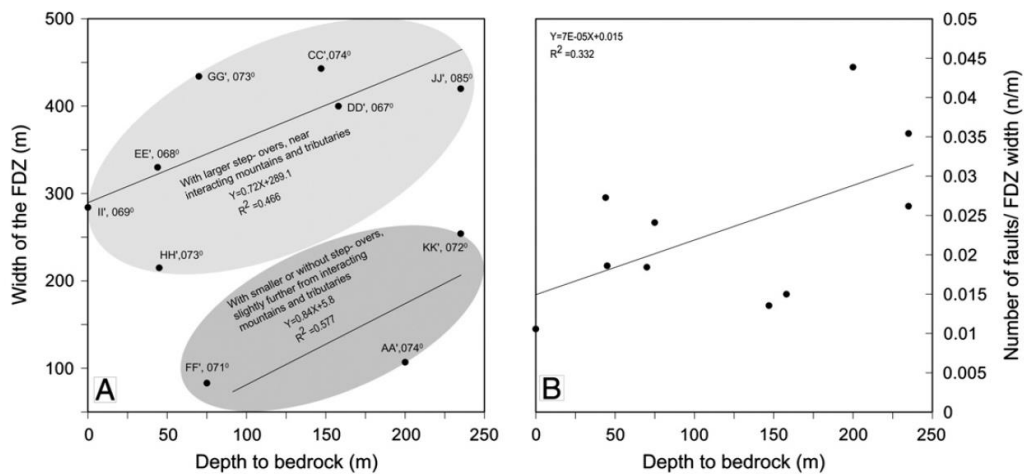


圖 2.7 紐西蘭的 Hope 斷層之斷層變形帶(FDZ)與覆土層厚度關係，透過資料統計

可知上覆土層越厚，則斷層變形帶越寬(Khajavi et al. 2014)

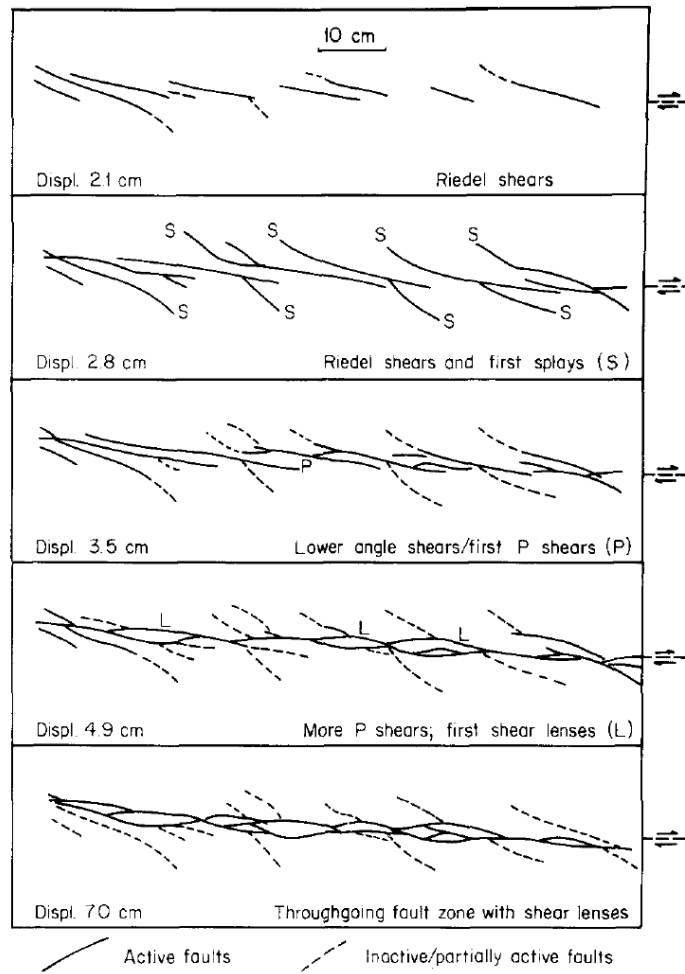


圖 2.8 砂箱試驗中乾砂受橫移斷層錯動的演化，其中雁型排列的地表破裂跡可稱為雷氏剪裂(Riedel shears)(Naylor et al. 1986)

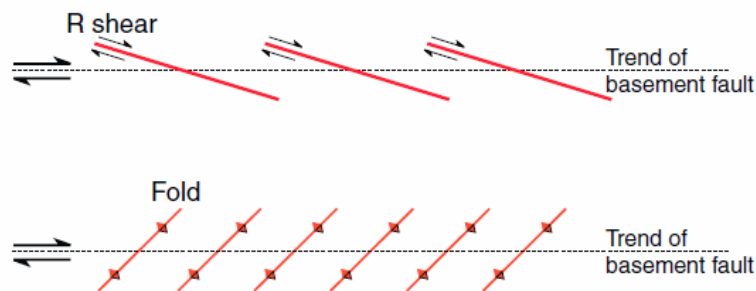
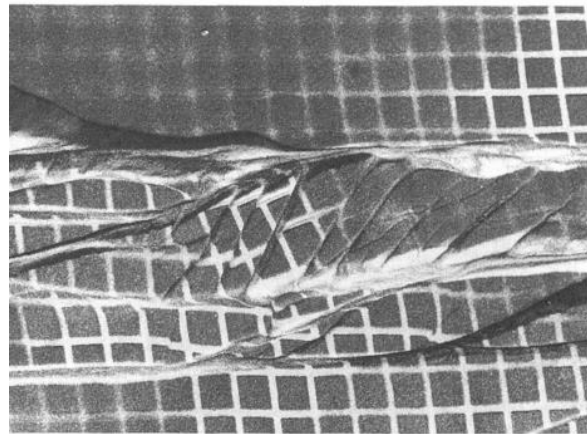


圖 2.9 俯視圖可觀察的地表變形特徵，包括雷氏剪裂與褶皺的排列方向(Dooley & Schreurs 2012)



主変位剪断帯内のブロックの回転 (密な豊浦標準砂地盤, 層厚400mm)

	横ずれ断層			斜めずれ断層	横ずれ断層	
	ケース1 H=400mm dense	ケース2 H=400mm loose	ケース3 H=100mm dense	ケース4 H=100mm dense	ケース5 H=50mm dense	ケース6 H=50mm loose
Riedel shear	○	○	○	○	○	○
Antithetic riedel shear	○	×	○	×	×	×
Lower-angle shear	○	○	○	○	○	○
P shear	○	○	○	○	○	○
剪断層A	—	—	—	○	—	—
剪断層B	—	—	—	○	—	—
剪断層分布域の幅 (W) W/H	939mm 2.35	217mm 0.54	235mm 2.35	100mm 1.00	96mm 1.92	50mm 1.00
主変位剪断帯の幅 (Wp)	28~98mm	28~50mm	21~49mm	—	—	—
剪断層模型地盤表面到達時の 断層変位量 (D) D/H	10~20mm 0.025~0.05	25~30mm 0.063~0.075	6~8mm 0.06~0.08	6~8mm 0.06~0.08	6~7mm 0.12~0.14	5~6mm 0.10~0.12

○発達
×発達しない

圖 2.10 基盤断層變位伴隨第四紀地層和表面變形之砂箱試驗成果(上田圭一 & 谷和夫 1999)

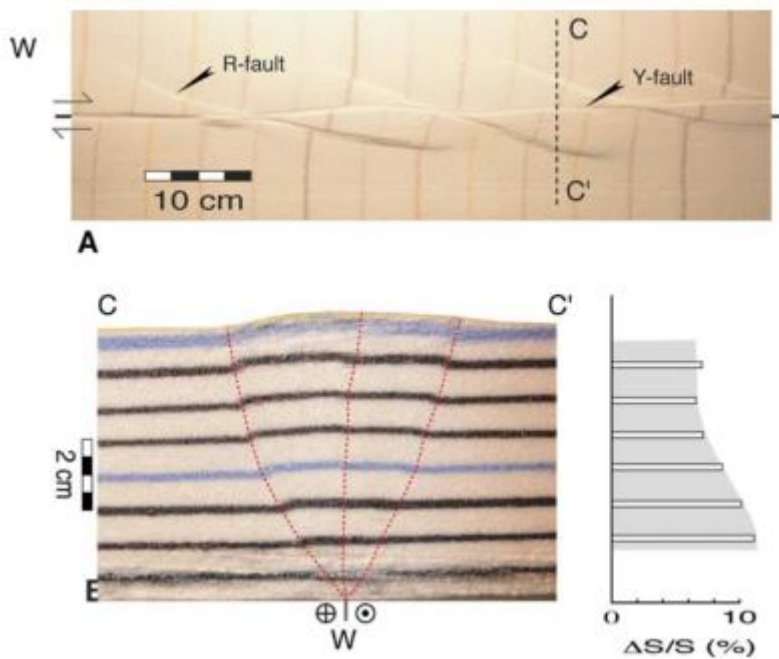
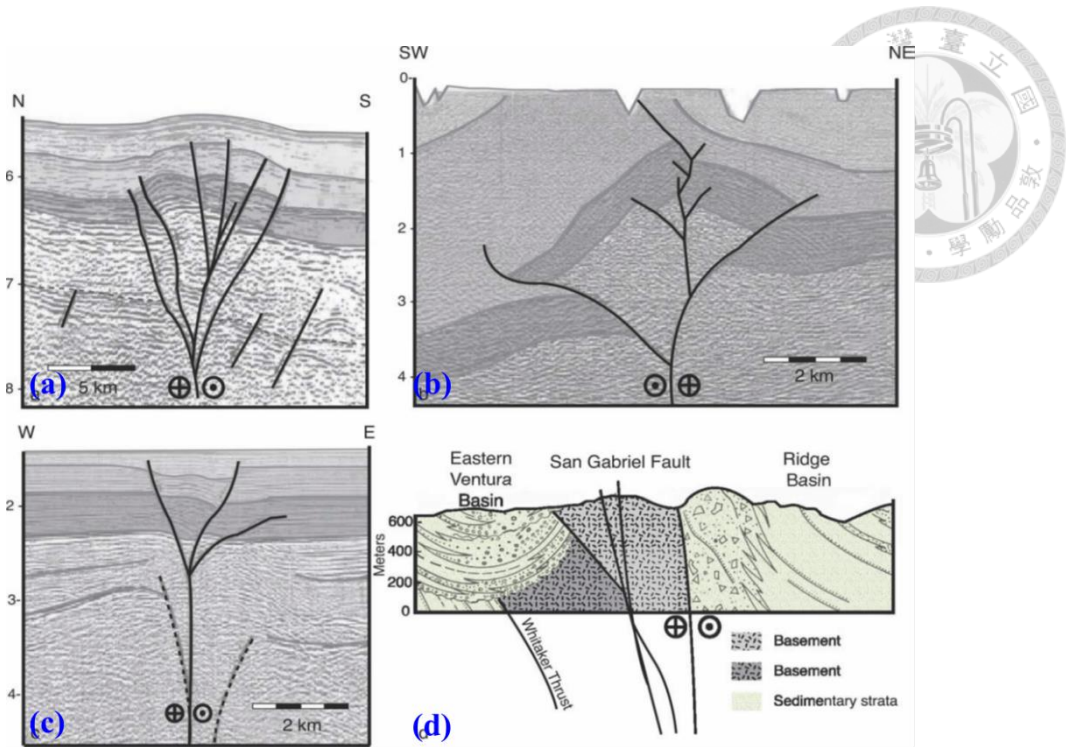
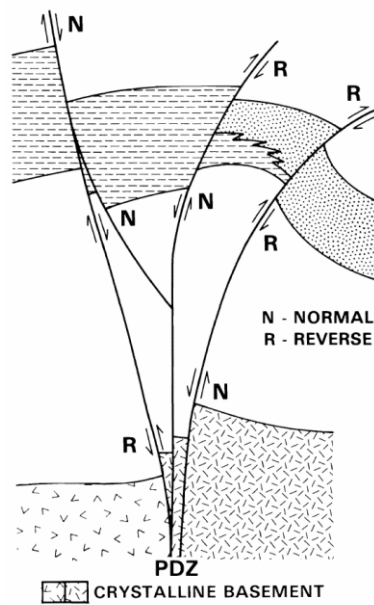


圖 2.11 側視圖可觀察的地層變形特徵，其中(a.b)背斜形式稱為正花狀構造 (positive flower structure)，(c.d)向斜形式稱為負花狀構造(negative flower structure)(Le Guerroué & Cobbold 2006)



MAJOR CHARACTERISTICS

- BASEMENT - INVOLVED
- PDZ SUB-VERTICAL AT DEPTH
- UPWARD DIVERGING & REJOINING SPLAYS

JUXTAPOSED ROCKS

- CONTRASTING BASEMENT TYPE
- ABRUPT VARIATIONS IN THICKNESS & FACIES IN A SINGLE STRATI-GRAPHIC UNIT

SEPARATION IN ONE PROFILE

- NORMAL- & REVERSE-SEPARATION FAULTS IN SAME PROFILE
- VARIABLE MAGNITUDE & SENSE OF SEPARATION FOR DIFFERENT HORIZONS OFFSET BY THE SAME FAULT

SUCCESSIVE PROFILES

- INCONSISTENT DIP DIRECTION ON A SINGLE FAULT
- VARIABLE MAGNITUDE & SENSE OF SEPARATION FOR A GIVEN HORIZON ON A SINGLE FAULT
- VARIABLE PROPORTIONS OF NORMAL- & REVERSE-SEPARATION FAULTS

圖 2.12 橫移斷層系統在剖面下的特徵，對同一斷層而言，斷層的傾斜方向在不同的剖面上可能改變，且深度改變其運動方向與距離也不盡相同(Christie-Blick & Biddle 1985)



第3章 研究方法

本研究選用地震案例文獻彙整與砂箱物理試驗之方法，分別作為基本行為觀察及定量分析。在現地案例中彙整近年地震事件文獻，根據斷層滑移分量特性進行分類，整理影響地表破裂跡分布之斷層參數。並以室內砂箱試驗模擬及比對，除選取合宜砂箱滑移試驗參數外，並驗證室內試驗之合理性。基於已分析的試驗方法，以不同試驗歷程進一步探討。


本研究之砂箱試驗工作包含兩個部份，第一部份係針對砂箱模型進行重複性試驗，以期分析之結果，能免除邊界效應與完成試驗再現性，以確認本研究分析工具及方法之可行性。

第二部份參考歷史地震資料，作為簡化基盤滑移方位及滑移量依據。以探討斜移斷層作用時，上覆土層之變形分析，包含斷層沿線地形、斷層錯動歷程地貌細部特徵變化、破裂跡發展順序及遷移的行為、斷層帶影響範圍等。再者，探討當滑移分量不同時，其與剪切帶間之相互關係。由分析所得之結果，作為未來避震規劃之參考。

3.1 砂箱模型

砂箱試驗設備，考量斷層滑移分量、上覆土層厚度對土體變位分佈之影響外，因斜移斷層之基盤錯動的型態除了傾向滑移的分量之外還需要加上走向滑移的分量，也就是設計橫移斷層上盤的砂箱必需在垂直及水平方向上都可以移動，砂箱試驗模型、座標及參數如圖 3.1，其中 Y 方向為斷層面延伸方向。本研究砂箱試驗區域尺寸為 100 cm(長)×30 cm(寬)×10 cm(高)，高度則視所鋪設砂層厚度而定，照片如圖 3.2。

斷層傾角設定為 90 度，砂箱沿斷層兩側分為 Plate1(負責水平移動)及 Plate2(負責垂直移動)兩部份，動力由螺桿連接步進馬達控制，移動速率可設定 0.025~0.25 mm/min 同時控制沿斷層面走向與傾向移動，平移、抬升及陷落最大可移動距離為



3 公分。由 Plate1 之相對 Plate2 左移或右移，分別模擬左移斷層或右移斷層作用行為。由 Plate2 之相對 Plate1 抬昇或下降，分別模擬逆斷層或正斷層作用行為。為方便觀察土層變位，砂箱盒皆採用 1 公分厚壓克力板固定。鋪砂完成後，由螺桿控制 Plate1 相對運動模擬平移斷層滑移錯動之現象，基盤之水平滑移量為 2.5 公分。同時則將數位攝影機調整後於砂箱上方約 1 公尺處，以固定焦距方式連續拍攝。

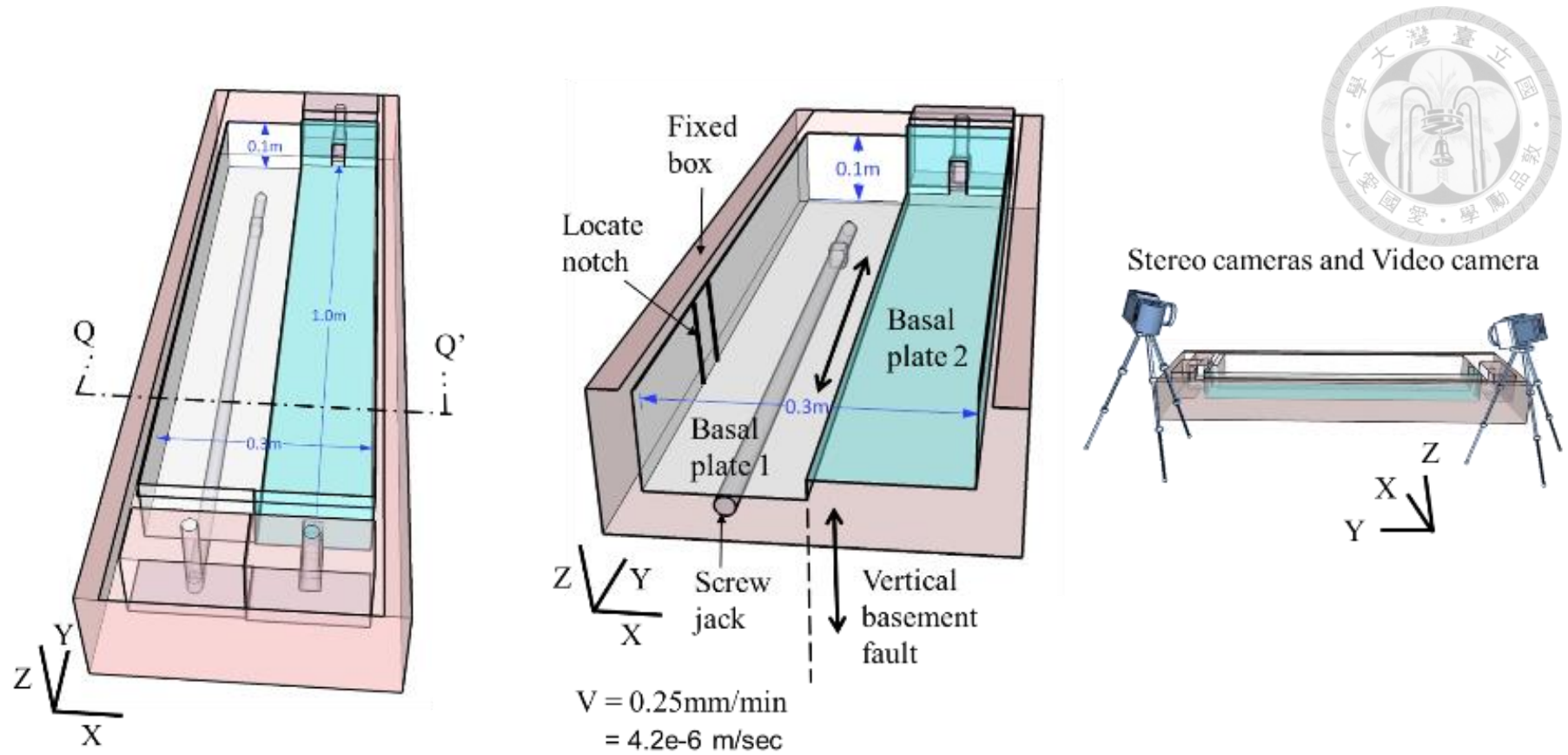


圖 3.1 斜移斷層砂箱試驗模型、座標及參數，其中 Y 方向為斷層面延伸方向



圖 3.2 砂箱模型照片，試驗區域尺寸為 100 cm(長)×30 cm(寬)×10 cm(高)，高度則視所鋪設砂層厚度而定



3.2 砂箱實驗材料性質

砂箱實驗中為控制上覆砂土層之材料參數，因此選擇乾燥石英砂。砂土之級配不良級配(poorly graded)，細粒料含量極少，僅有約 0.2 % 通過 200 號篩，大部分的砂殘留於 100 號篩上以及 140 號篩上，砂顆粒極細且均勻，依統一土壤分類法屬於 SP。石英砂最大及最小乾單位重，由日本 JSF T26-81T 之試驗方法求得，其最大乾單位重為 16.27 (kN/m³)，最小乾單位重為 13.52 (kN/m³)。試體製作之相對密度，由此最大最小乾單位重計算求得。本試驗用砂分別針對相對密度 40 %、60 %、70 % 之乾砂試體進行直接剪力試驗，試驗結果相對密度 40 % 乾砂之內摩擦角約為 35。表 3.1 為試驗砂樣的基本物理性質；圖 3.3 為試驗用砂篩分析曲線。

3.3 砂箱實驗方法及過程

砂箱試驗過程中分為兩個部分，主要為前置作業及試驗過程。前置作業包含防止漏砂、染色砂準備等。染色砂準備目的，為觀察試驗進行中上覆土層中斷層面之發展過程及行為。因此實驗時須利用染色之石英砂作為分層，以模擬自然環境中地層之層狀構造。

過去研究顯示，滑移速度快所形成之斷層帶之影響範圍較基盤抬昇速度慢者小。但其變形量較大，因此其崖面坡度較陡。但由於砂箱實驗中之速度、時間尺度與真實地震錯動速度、時間尺度相較，仍有較大差距，而探究速度變化並非本研究重點，因此本研究僅採用定速設定，速度為 4.17×10^{-6} m/sec，仍可提供一個比對之參考，未來如有更精密模型對此問題可作更進一步比對。砂箱試驗配置鋪砂完成後，由螺桿控制動盒相對位移模擬左移斷層滑移錯動之現象，同時則將數位攝影機調整後於砂箱上方約 1 公尺處，以固定焦距方式連續拍攝。紀錄基盤滑移過程中，地表砂土斷層尖端擴展、擴展路徑及最後地表變形之形貌。

砂箱試驗過程中隨著基盤滑移過程中斷層於地表發展之情形，由於基盤滑移過程中砂土顆粒本身受到剪動時，會產生顆粒間重新排列或剪動之現象。但實驗中

僅將色砂層用於模擬地層分層，因此在地表不易觀察斷層破裂情形，未來將最頂部表層也採用色砂層作為標誌層，由標誌層發生扭曲或剪動之現象，則將此定義斷層面已發展至該色砂層之位置。依此可描繪出斷層面發展之情形及斷層面遷移行為。

導入以影像為基礎的三維重建影像分析，採用 Nikon D700 單眼數位相機拍攝，架設腳架並使用專用快門遙控器進行拍攝，以減少機身晃動，維持影像品質。本文使用空拍技術拍攝一系列重疊影像，透過 Agisoft Photoscan 影像分析軟體 (<http://www.agisoft.com/>)，以影像為基礎的三維重建(photo-based 3d reconstruction)，匯入 10-15 張影像進行匹配，配合已知控制點座標(圖 3.4)，建置數值地形模型(DTM, Digital Terrain Model)，其精度達 0.3 mm，與前人試驗砂箱比較，屬於使用大砂箱盒產製毫米以上高精度三維地形，且進行剖面觀察紀錄，如表 3.2 所示。

3.4 研究規劃與觀察項目

不同的斷層類型活動時，顯著影響上覆土層變形行為，而斷層作用後若斷層面出露地表可透過斷層擦痕線理與水平夾角的**滑移角(Rake angle)**表示滑動方向，若未出露地表，則可透過斷層面解反求斷層面滑移方向，參考歷史地震資料顯示，當斷層兩側岩盤相對位移時，其滑移方向包括斷層走向及傾向，因此選定斷層滑移角作為重要探討參數。

砂箱試驗觀察可分為以下項目：1.地貌分布、2.高程差異所造成的地表線形(破裂跡)特徵、3.地表指準線分析及斷層擴展距離比等地表影響範圍、4.山丘地貌坡向分析、5.土中斷層面及隨深度的變化、6.覆土厚度影響。

由前節所述，利用三維重建影像分析砂箱試驗，產製正射影像及數值高程。整理分析所產製的圖資，分別為正射影像、數值高程、坡向圖、坡度圖、粗糙度圖、日照陰影圖等，透過不同滑移角模型，比較各圖資差異，選定後續分析的主要圖資。包括滑移角 90 度的模型 4(圖 3.5)、135 度的模型 3(圖 3.6)及 180 度的模型 1(圖 3.7)，其中粗糙度指特定區域內，地表面積與投影面積比，不同滑移角試驗所呈現的粗糙

度分布位置不同，所呈現高粗糙度為白色區域，又高粗糙度亦表示高陡坡位置，經由對比與高坡度紅色區域範圍相當，因此後續分析採用坡度圖討論。

配合不同討論課題分析所需圖資，構想如圖 3.8，利用數值高程分析砂體垂直位移值並使用分析軟體產製陰影圖、坡度圖、坡向圖，協助地表破裂跡與擴展路徑之紀錄，數化基盤滑移過程中，地表砂土斷層尖端擴展、擴展路徑及最後地表變形之形貌；透過正射影像了解地表砂體水平位移量值；利用剖面照片，繪製土中斷層面及利用線性回歸求取土中最大影響範圍。

3.5 研究相關名詞定義

本研究主要探討斷層錯動引致上覆土層變形行為，因此基地為一層厚度相當厚的土壤層，而此層土壤層底下有一僅貫穿基盤的活動斷層(active fault)。其地下地質分為蓋層(cover)及基盤(basement)。其中為描述方便，參考 Lin et al. (2006) 蓋層於本文中簡稱為上覆土層(overbueden)。

由於斷層錯動(faulting)(以下簡稱為斷層作用)引致上覆土層變形行為受到斷層傾角、基盤抬昇量、上覆土層厚度與覆土材料性質等因素影響。斷層尖端擴展過程中，具有極大之變異性。參考 Lin et al. (2006) 當斷層尖端擴展至地表時，其與初始斷層尖端之水平距離成為 W 影響範圍。其與上覆土層之厚度(H)比值 W/H (以下簡稱為斷層擴展距離比)。其斷層尖端在上覆土層之擴展路徑稱為斷層面。在斷層尖端擴展時其與基盤滑移量有關，因此定義基盤滑移量(S)與上覆土層比值為 S/H ，稱為基盤滑移比，另外滑移量可分為走向滑移 S_y 與傾向滑移 S_z ，如圖 3.9 所示。

本文為觀察上覆土層基本行為及定量分析，在砂箱實驗覆土層及表土層鋪設色砂層作為指準層，在斷層作用時指準層產生扭曲或變形現象則視為斷層尖端已擴展至該層位置。由斷層尖端擴展之路徑及軌跡為斷層面，其一個或數個斷層面稱為斷層帶(fault zone)。



表 3.1 本試驗用砂之基本物理性質

砂樣	石英細砂
比重 G_s	2.65
平均粒徑 D_{50} (mm)	0.193
有效粒徑 D_{10} (mm)	0.147
內摩擦角 ϕ ($D_r=40\%$)	35°
最大乾密度 ρ_{dmax} (g/cm^3)	1.66
最小乾密度 ρ_{dmin} (g/cm^3)	1.38
統一土壤分類	SP

表 3.2 砂箱尺寸及記錄方法比較

Author, years	砂箱尺寸	表面記錄	剖面記錄
Naylor, Mandl, & Supesteijn, 1986	$100 \times 50 \text{ cm}^2$	地表破裂跡描繪	剖面斷層面描繪
上田圭一 和 谷和夫, 1999	$600 \times 250 \text{ cm}^2$	地表破裂跡描繪	剖面表面描繪
Schrank & Cruden, 2010	$16 \times 14 \text{ cm}^2$	影像三維重建 精度 0.1 mm	x
Mitra & Paul, 2011	$34.3 \times 25.7 \text{ cm}^2$	雷射掃描 精度 0.4 mm	x
本研究	$100 \times 30 \text{ cm}^2$	影像三維重建 精度 0.3 mm	剖面斷層面描繪

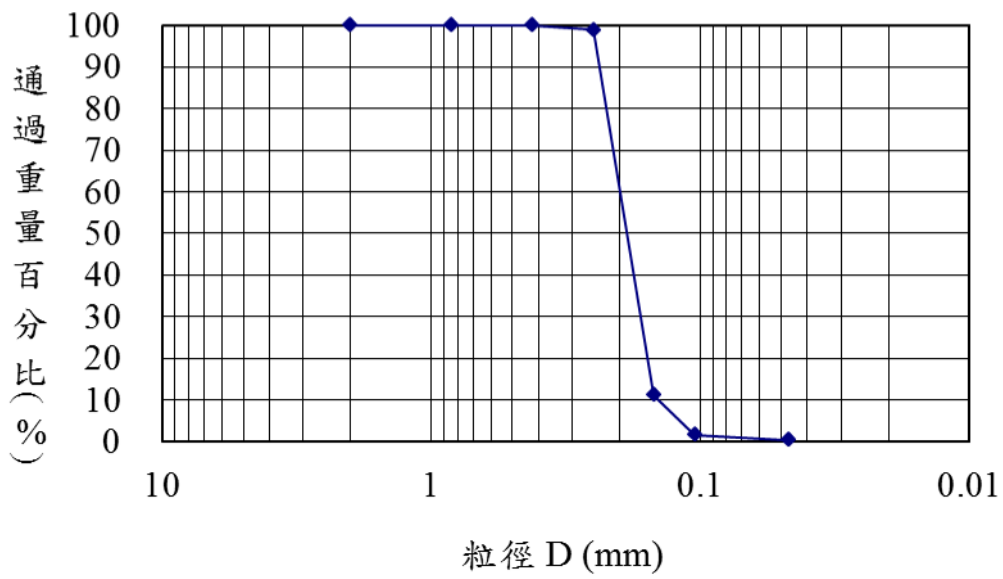
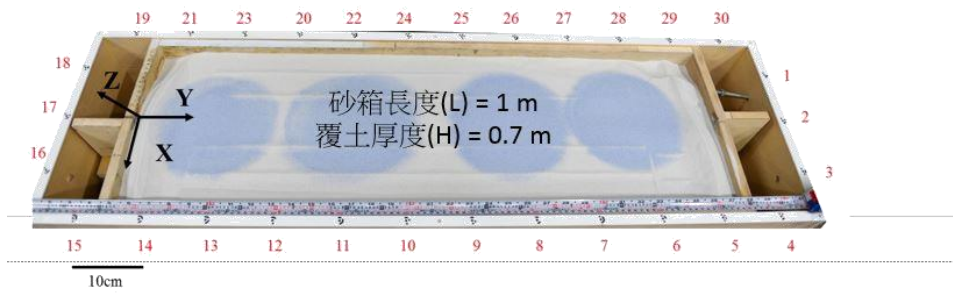


圖 3.3 試驗用砂之粒徑分佈圖



	x	y	z		X	y	z
1	-0.1	1.123	0.1	16	0.1	-0.113	0.1
2	0	1.123	0.1	17	0	-0.113	0.1
3	0.1	1.123	0.1	18	-0.1	-0.113	0.1
4	0.181	1.055	0.1	19	-0.175	-0.045	0.1
5	0.181	0.955	0.1	21	-0.175	0.055	0.1
6	0.181	0.855	0.1	23	-0.175	0.155	0.1
7	0.181	0.755	0.1	20	-0.175	0.255	0.1
8	0.181	0.655	0.1	22	-0.175	0.355	0.1
9	0.181	0.555	0.1	24	-0.175	0.455	0.1
10	0.181	0.455	0.1	25	-0.175	0.555	0.1
11	0.181	0.355	0.1	26	-0.175	0.655	0.1
12	0.181	0.255	0.1	27	-0.175	0.755	0.1
13	0.181	0.155	0.1	28	-0.175	0.855	0.1
14	0.181	0.055	0.1	29	-0.175	0.955	0.1
15	0.181	-0.045	0.1	30	-0.175	1.055	0.1

圖 3.4 砂箱模型已知座標點空間分布，使用於影像為基礎的地形三維重建

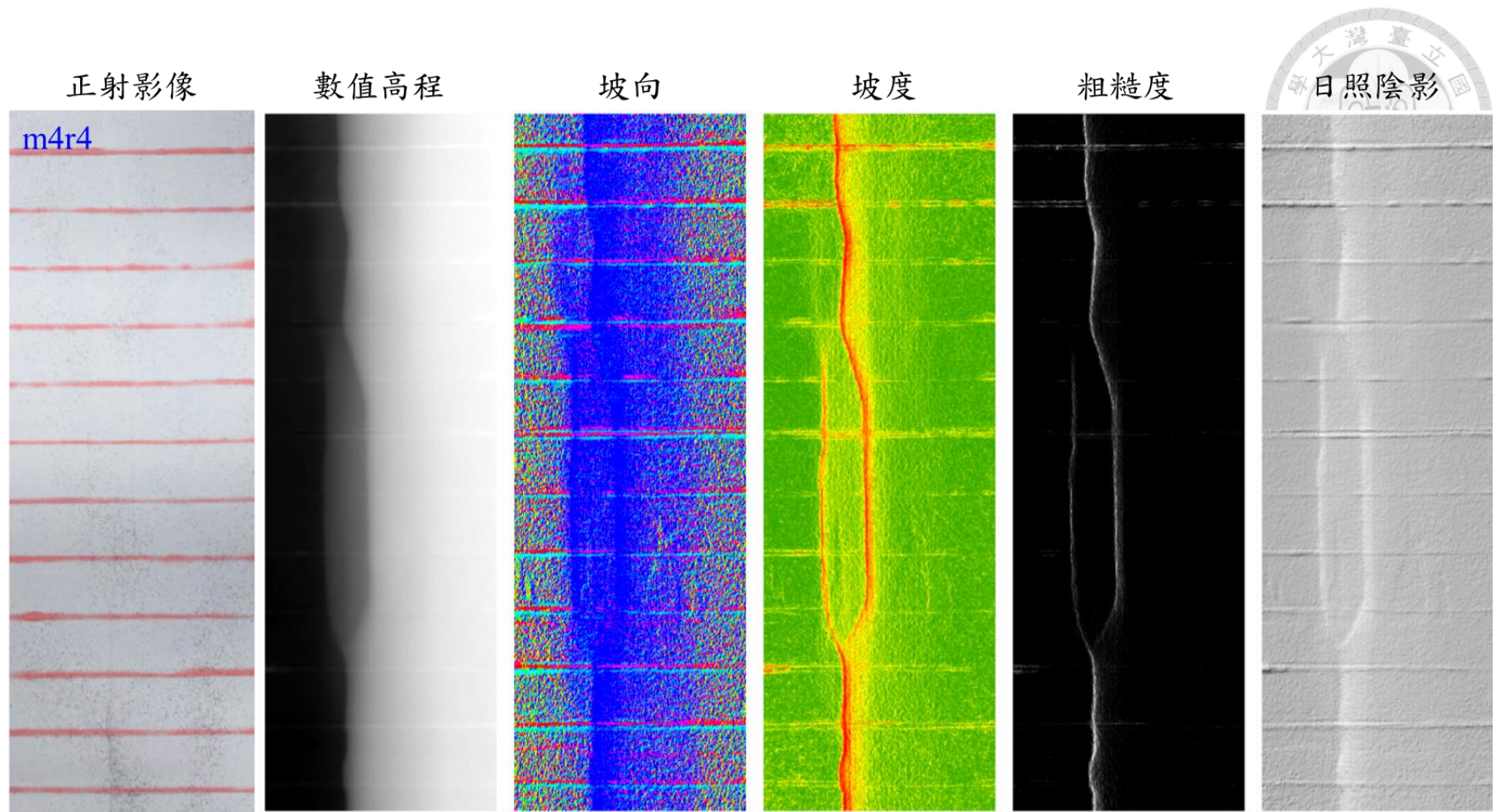


圖 3.5 斜移斷層砂箱試驗模型，滑移角 90 度的模型 4 正射影像、數值高程、坡向圖、坡度圖、粗糙度圖及日照陰影圖

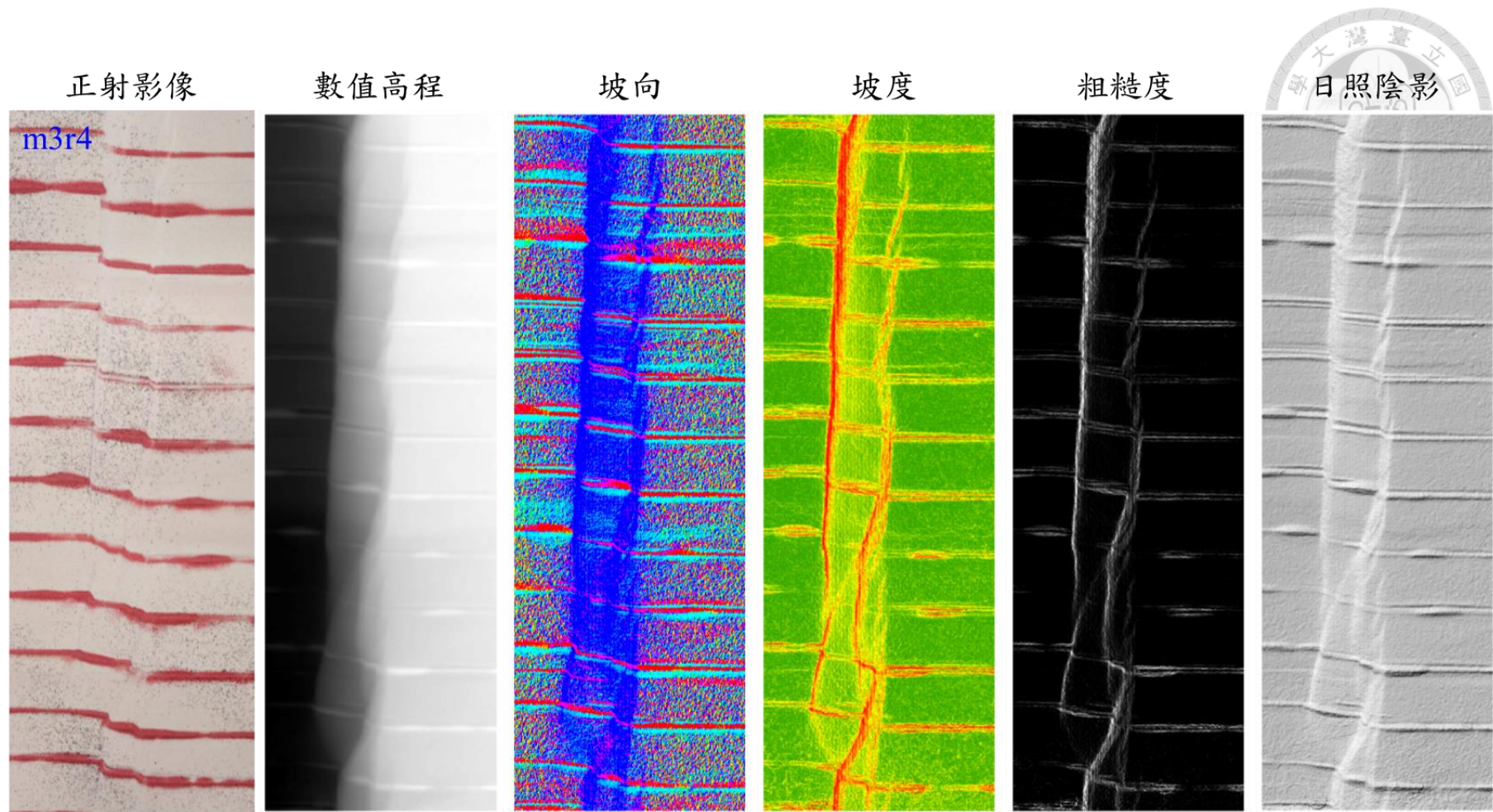


圖 3.6 斜移斷層砂箱試驗模型，滑移角 135 度的模型 3 正射影像、數值高程、坡向圖、坡度圖、粗糙度圖及日照陰影圖

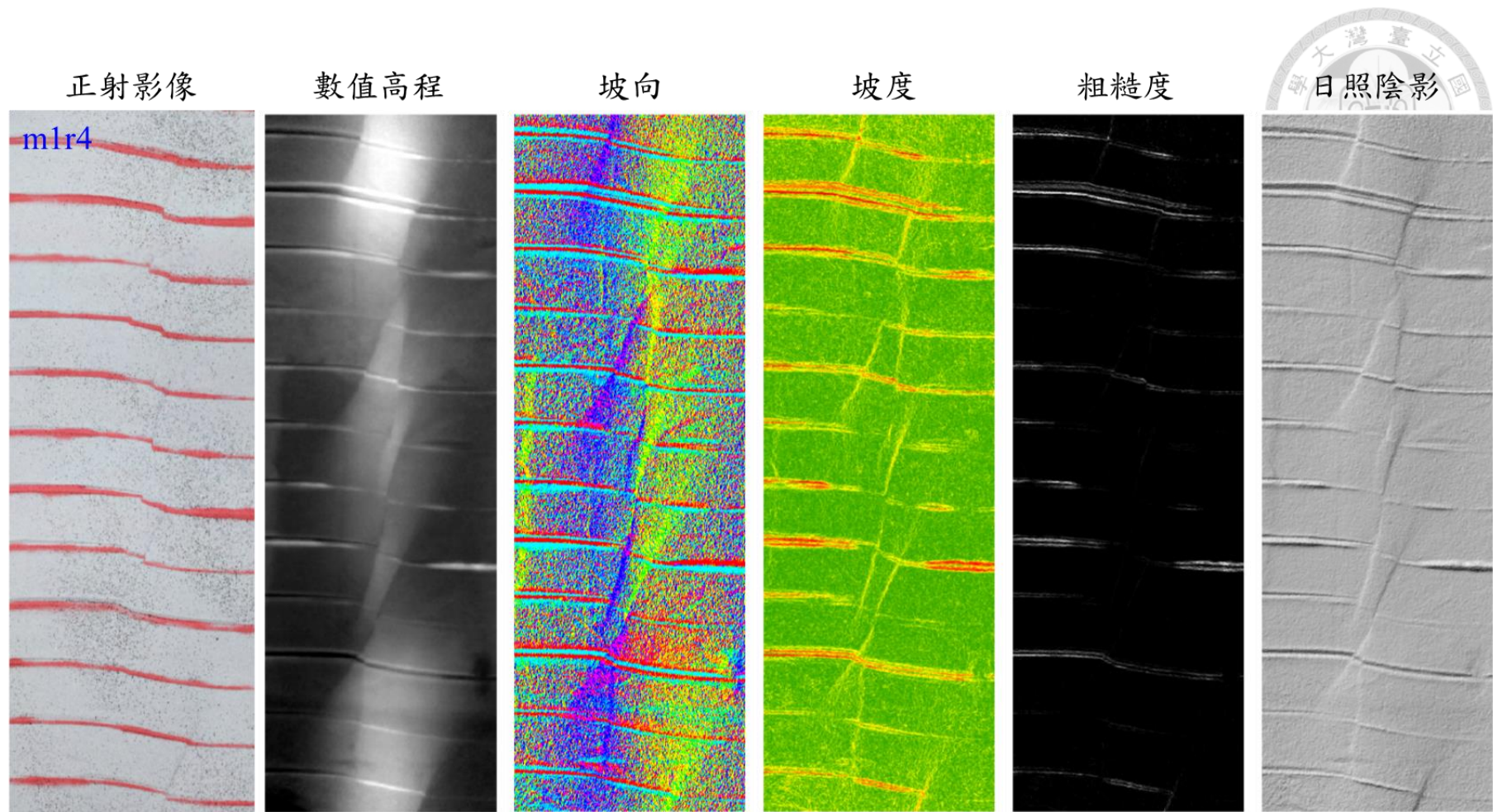


圖 3.7 斜移斷層砂箱試驗模型，滑移角 180 度的模型 1 正射影像、數值高程、坡向圖、坡度圖、粗糙度圖及日照陰影圖

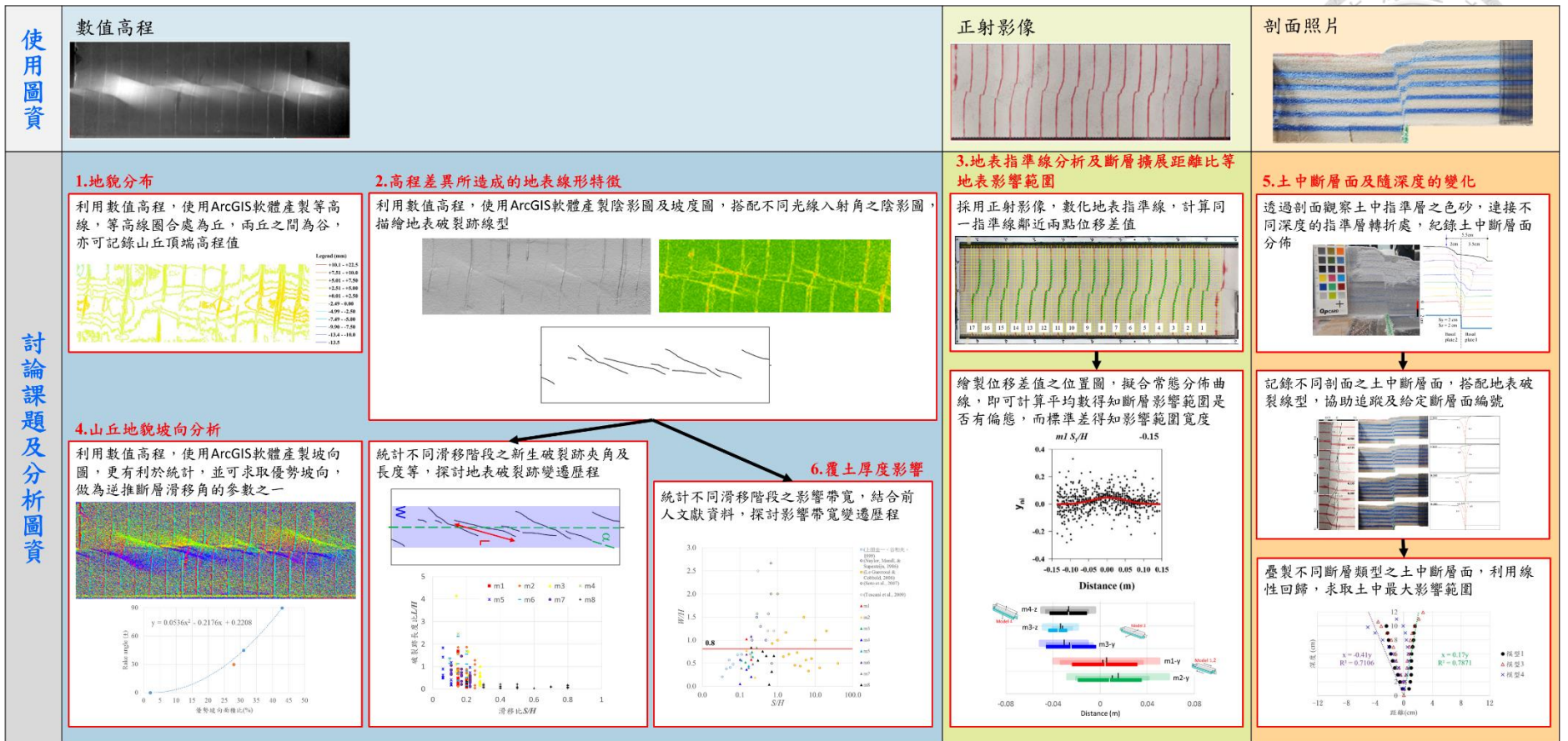


圖 3.8 砂箱試驗討論課題及分析圖資，利用數值高程分析砂體垂直位移值並使用分析軟體產製陰影圖、坡度圖、坡向圖，協助地表破裂跡與擴展路徑之紀錄，數化基盤滑移過程中，地表砂土斷層尖端擴展、擴展路徑及最後地表變形之形貌；透過正射影像了解地表砂體水平位移量值；利用剖面照片，繪製土中斷層面及利用線性回歸求取土中最大影響範圍

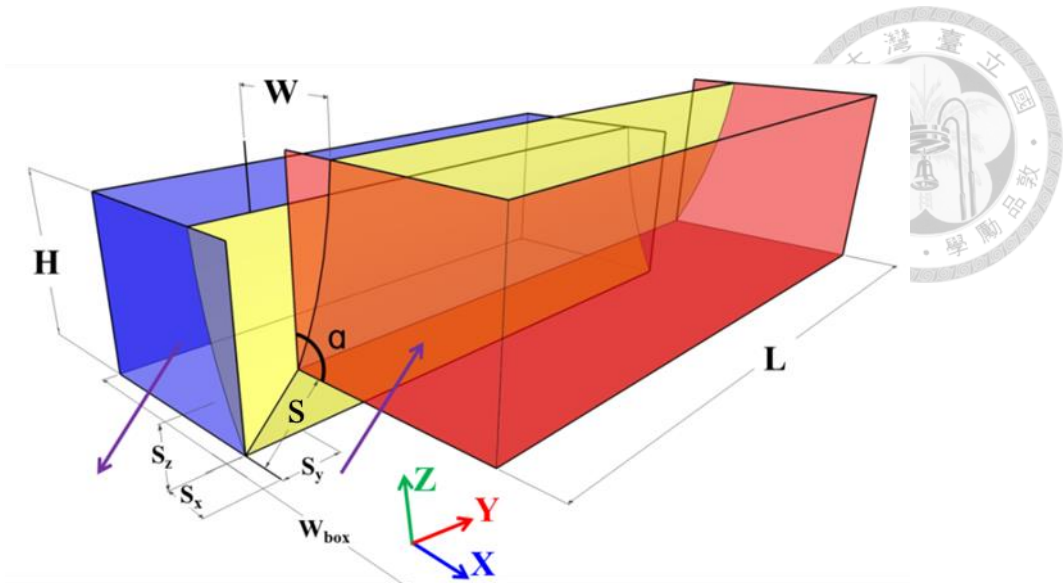


圖3.9 砂箱相關名詞示意圖，圖中黃色面代表土層中斷層尖端擴展路徑； W 代表斷層尖端擴展到地表之水平距離； H 代表上覆土層厚度； α 代表斷層基盤傾角及 S 代表基盤之滑移量，亦可根據三方向分為 S_x 、 S_y 、 S_z 。其中 W/H 表定義為斷層擴展距離比； S/H 定義基盤滑移比。



第4章 現地踏勘

針對近期地震斷層引致地表破裂調查，選定日本九州熊本地震之造震斷層，透過斷層資料彙整及討論，回饋於室內砂箱試驗規劃。

4.1 布田川-日奈久斷層

日本熊本地區於 2016 年 4 月 16 日發生規模 7.3 的地震，該次地震事件日本氣象廳命名為「平成 28 年（2016 年）熊本地震(Kumamoto earthquakes)」，本次事件於 4 月 14 日發生規模 6.5 的前震，政府單位緊急疏散民眾，並為了瞭解災況結合民間企業進行近地表航拍，而後於 4 月 16 日發生主震，所幸當時多數民眾因已經緊急避難，故傷亡人數少，且多數航拍作業已經啟動，故日本國土地理院掌握前震前、主震前後之航照影像，清楚記錄此次事件各階段時期地表影像，也公開上網，提供野外調查前非常寶貴的資訊。

地震活動斷層為布田川斷層帶及日奈久斷層帶(圖 4.1)，本研究主要探討斷層為主震活動斷層之布田川斷層，此次地震深度均在 10~12 公里之間，斷層滑移類型為右移兼具正斷層，透過日本國土地理院資料顯示，布田川斷層走向為 235 度，傾斜為 60 度，滑移向量為-161 度，屬於右移正斷層。前期資料顯示該斷層東起阿蘇火山西側山麓，呈南偏西 62 度方向延伸，經過熊本市南方出海，續接宇土半島北岸延伸至上天草市附近，可分為布田川區間、宇土區間及宇土半島北岸區間，總長度達 64 公里以上，布田川區間斷層長度約 19 公里，斷層走向為北 55 度向東，地表附近傾角為高角度，深部向西北傾，活動週期為 8 千 1 百年至 2 萬 6 千年(地震調查研究推進本部 2013)，為本次事件錯移量最大地區，錯移約 2 公尺(經緯度座標：32.8045，130.8591)，主要活動方式為右移且具有東南側抬昇分量。

現地勘查時間為 2016 年 7 月 30 日，距離地震事件約 3 個月，多數商業活動已經復甦，但農業活動進展較緩，為瞭解地震事件對地表破裂之形貌，故本次調查重點選定下陣(下陳)(A)、堂園(B)及黑川(C)地區之農地，其相對位置如圖 4.2 所示，

野外照片座標如表 4.1 所示，藉以記錄未受結構物影響之地表位移。

本地震斷層沿「都市圈活動斷層圖熊本圖幅(圖 4.3)」及「活動斷層詳細數值地圖」所示之布田川斷層出露地表。透過調查確認斷層位於南阿蘇村立野至御船町滝川間，長度約 26 公里(以下稱為主斷層)，另與既有活動斷層圖內斷層線位置不同，發現一長約 5 公里的地表地震斷層(以下稱為分支斷層，亦有其他文獻稱為木山斷層)。如圖 4.4 所示，該斷層線於益城町上陣(上陳)地區周邊的主斷層開始分支，延西南西方向延伸至益城町役場。因此在益城町中心地區，有許多房舍倒塌，產生嚴重損壞，推論為分支斷層錯動引致。

主斷層及分支斷層均顯示為右移，與震源機制解相一致。既有現地踏勘確認最大平移量，在分支斷層東北角下陣(下陳)地區約 1.3~1 公尺(圖 4.5)錯移，主斷層堂園地區約 2 公尺(圖 4.6)錯移。主斷層東北端自南阿蘇村立野地區起，於河陽地區可觀察到向右滑移約 90 公分，抬升約 60 公分(圖 4.7)，主斷層線的垂直位移量依斷層線位置不同而改變，另一方面，分支斷層主要為南方隆起，主斷層最大垂直位移量約 70 公分，分支斷層最大垂直位移量約 40 公分。

表 4.1 2016 年 7 月 30 日野外照片資料

編號	座標	地區
1	32.8007, 130.8500	益城町下陣(下陳)
2	32.8005, 130.8504	
3	32.8005, 130.8505	
4	32.8008, 130.8507	
5	32.8042, 130.8588	益城町堂園
6	32.8043, 130.8591	
7	32.8045, 130.8591	
8	32.8045, 130.8592	
9	32.8831, 130.9905	南阿蘇村河陽
10	32.8832, 130.9909	
11	32.8834, 130.9914	



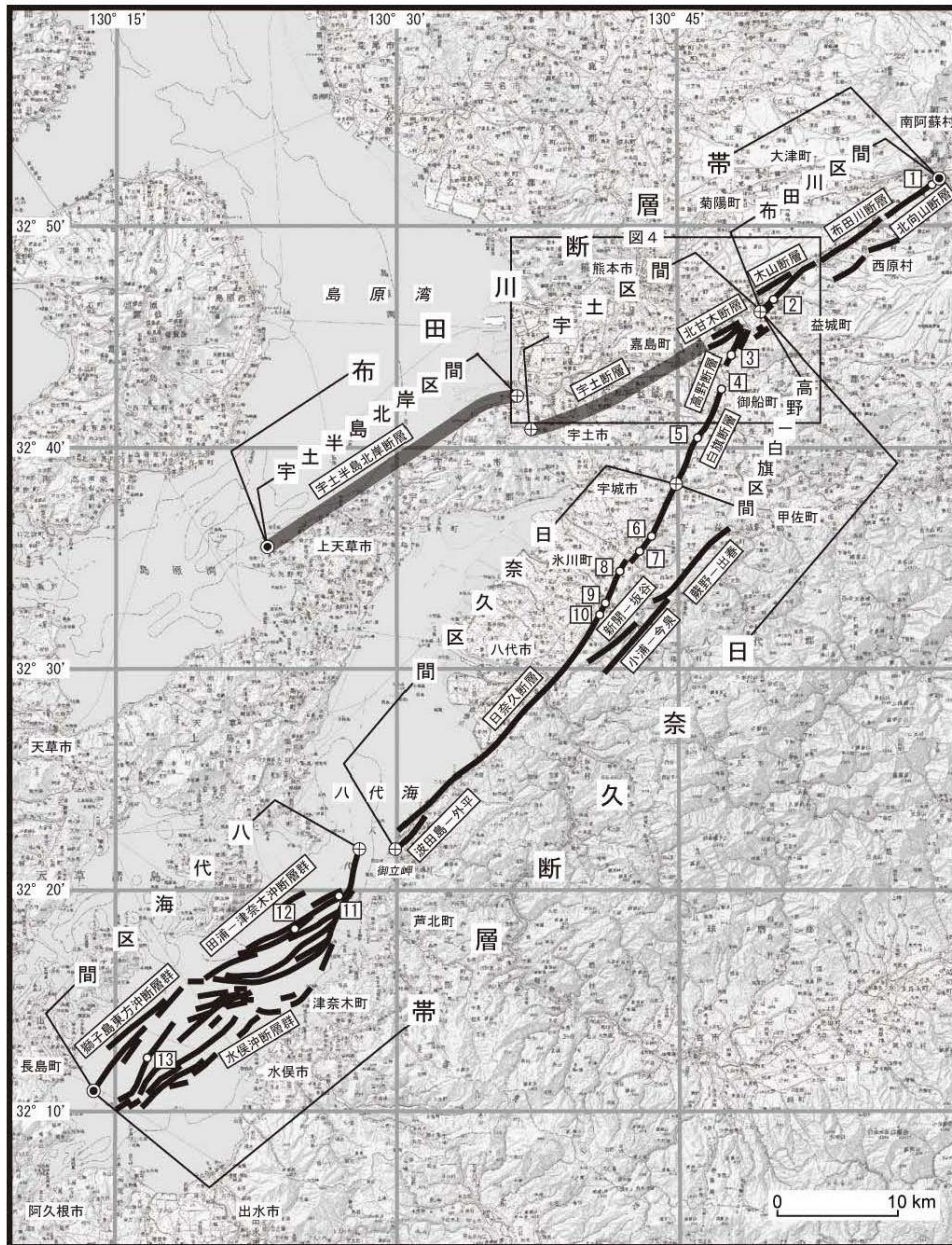


圖2 布田川斷層帶・日奈久斷層帶の活斷層位置と調査地点

1: 白川左岸地点 2: 田中地点 3: 高木地点 4: 白旗地点 5: 鱈瀬地点 6: 南小野地点 7: 南部田地点 8: 高塚B地点 9: 腹巻田地点 10: 梶地点 11: 八代海白神岩地点 12: 八代海津奈木沖地点 13: 八代海南西部海底地点

●: 斷層帶の北東端と南西端 ⊕: 活動区間の境界

活斷層の位置は活斷層研究会編(1991)、熊本県(1998b)、池田ほか(2001)、中田ほか(2001)、産業技術総合研究所・地域地盤環境研究所・東海大学(2011)及び地震調査研究推進本部地震調査委員会長期評価部会活斷層分科会による重力異常・地質構造の検討結果に基づく。

基図は国土地理院発行数値地図200000(地図画像)「熊本」「八代」を使用。網掛線は、重力異常、ボーリングや音波探査により位置が特定された活斷層。

圖 4.1 布田川・日奈久斷層帶活斷層位置，本次主震活動斷層之布田川斷層，此次地震深度均在 10~12 公里之間，斷層滑移類型為右移兼具正斷層(地震調査研究推進本部 (2013))

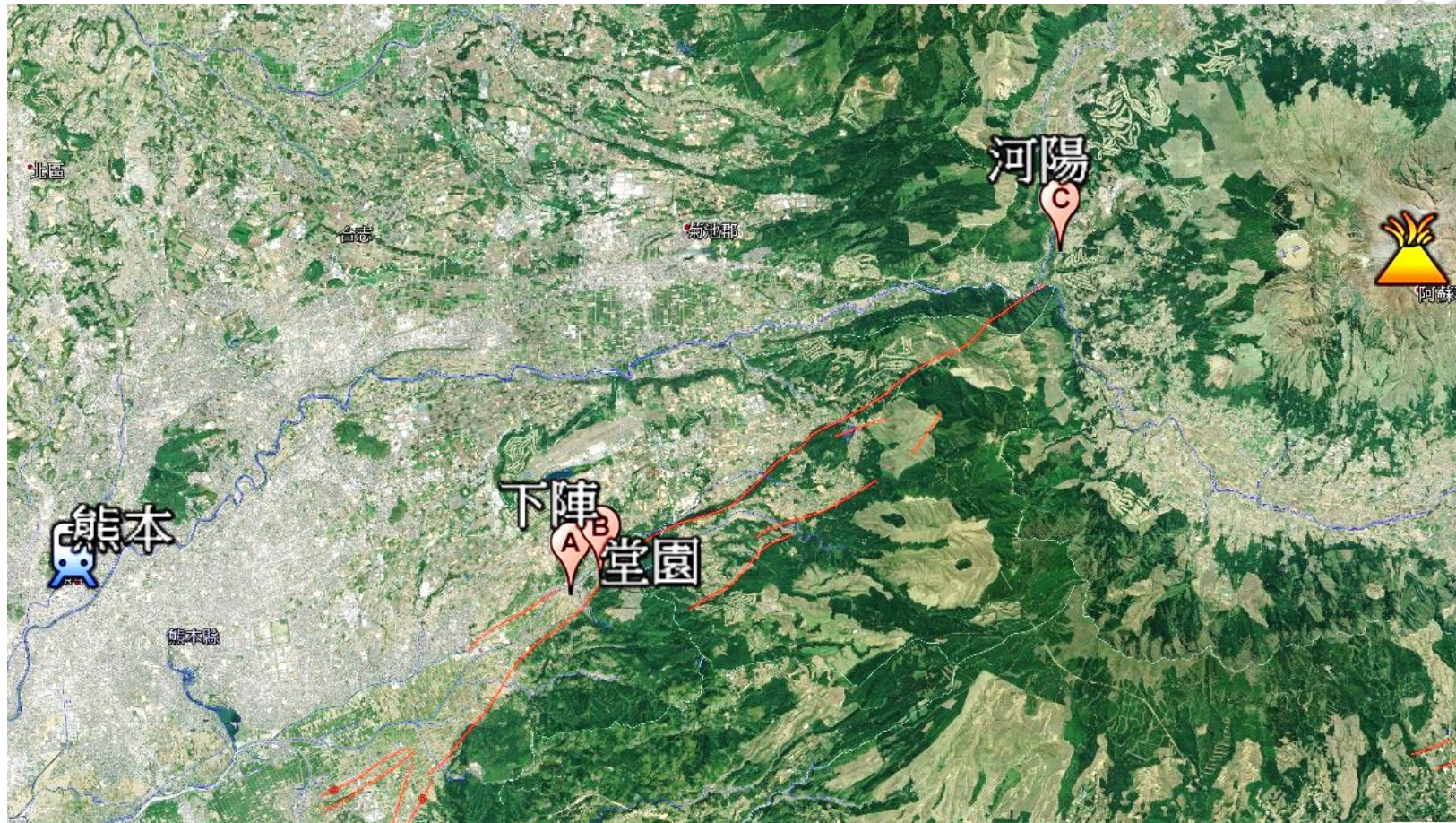


圖 4.2 現地踏勘停駐點，時間為 2016 年 7 月 30 日，距離地震事件約 3 個月，地點分別為下陣(下陳)(A)、堂園(B)及黑川(C)地區之農地

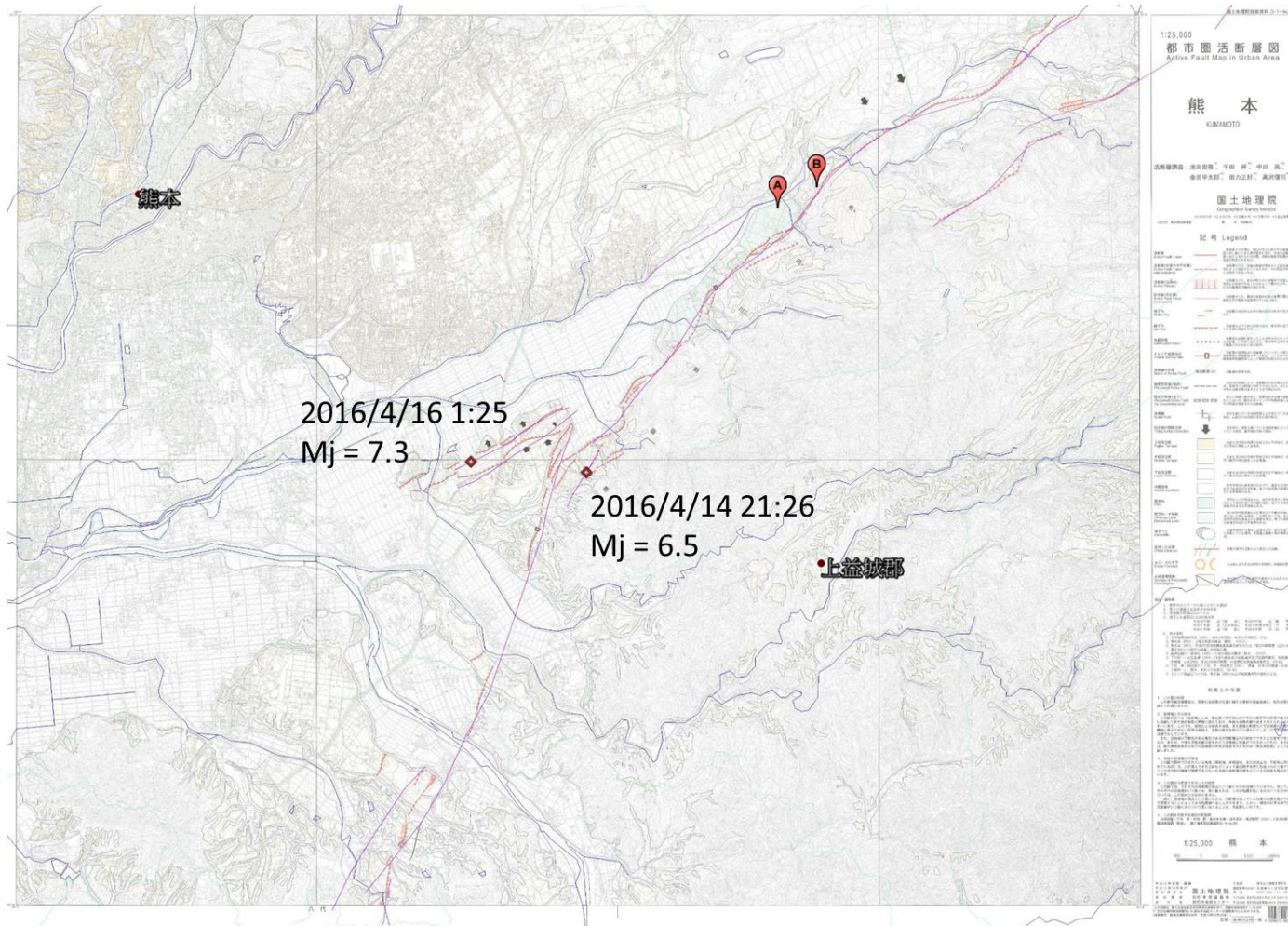


圖 4.3 熊本都市圏活斷層圖，圖中為前震及主震位置，另 A 為下陣地區 B 為堂園地區(改繪自池田安隆 et al. (2001))

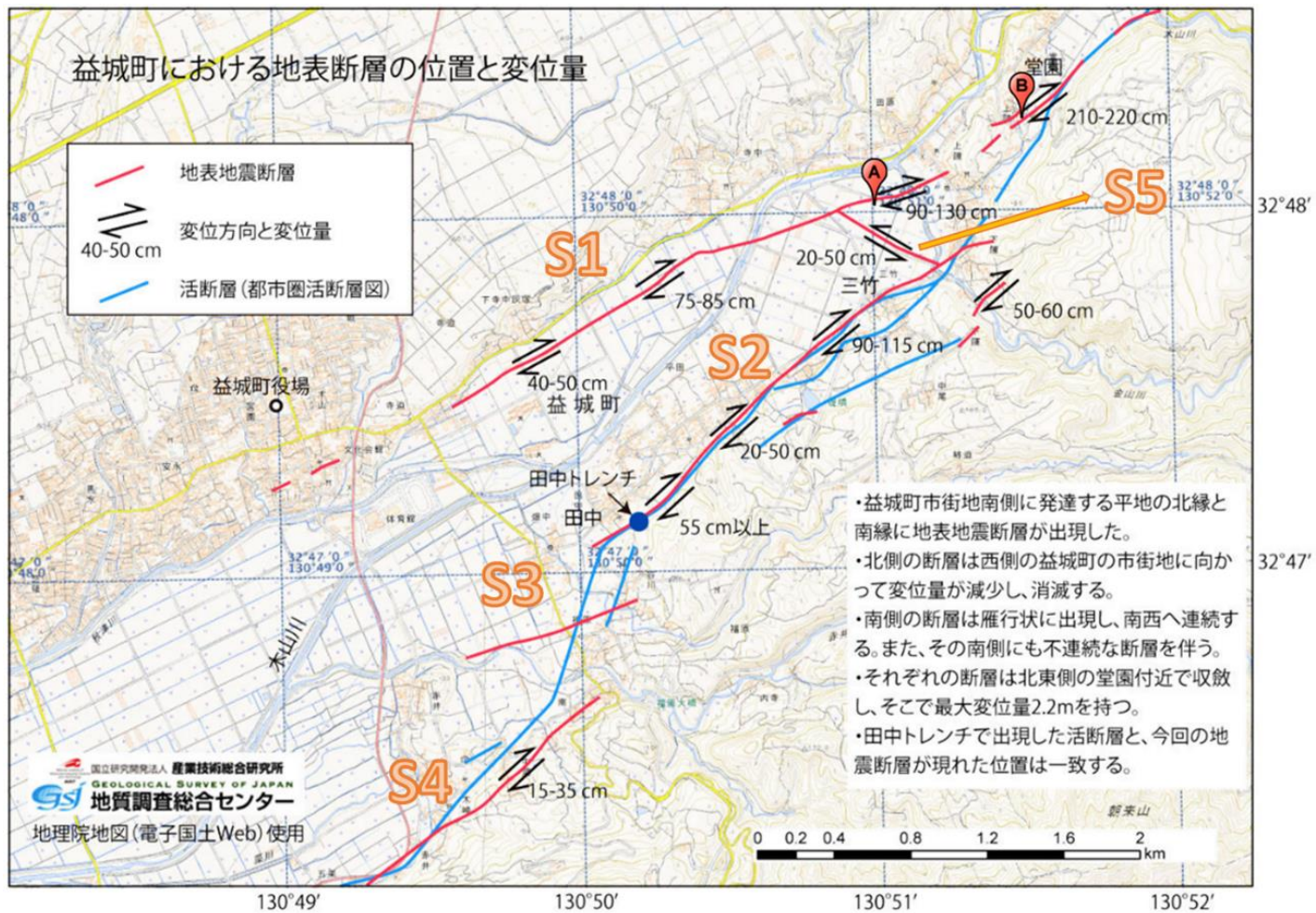


圖 4.4 現勘及地表破裂位置與變位量，A 為下墜地區 B 為堂園地區，S1-S5 表示地表破裂跡

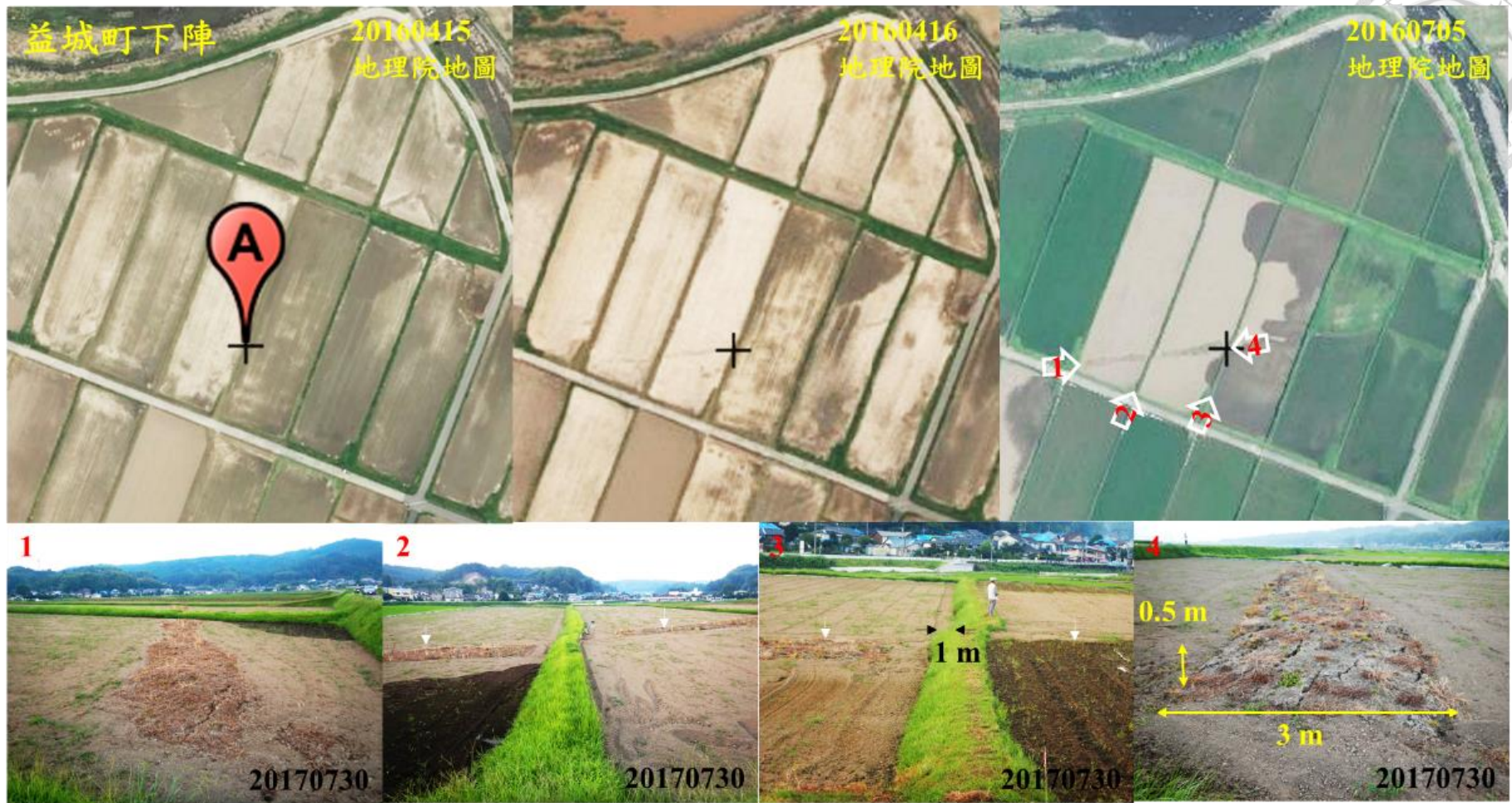


圖 4.5 現地踏勘下陣(下陳)(A)，斷層於此區水平錯移約 1.3~1 公尺

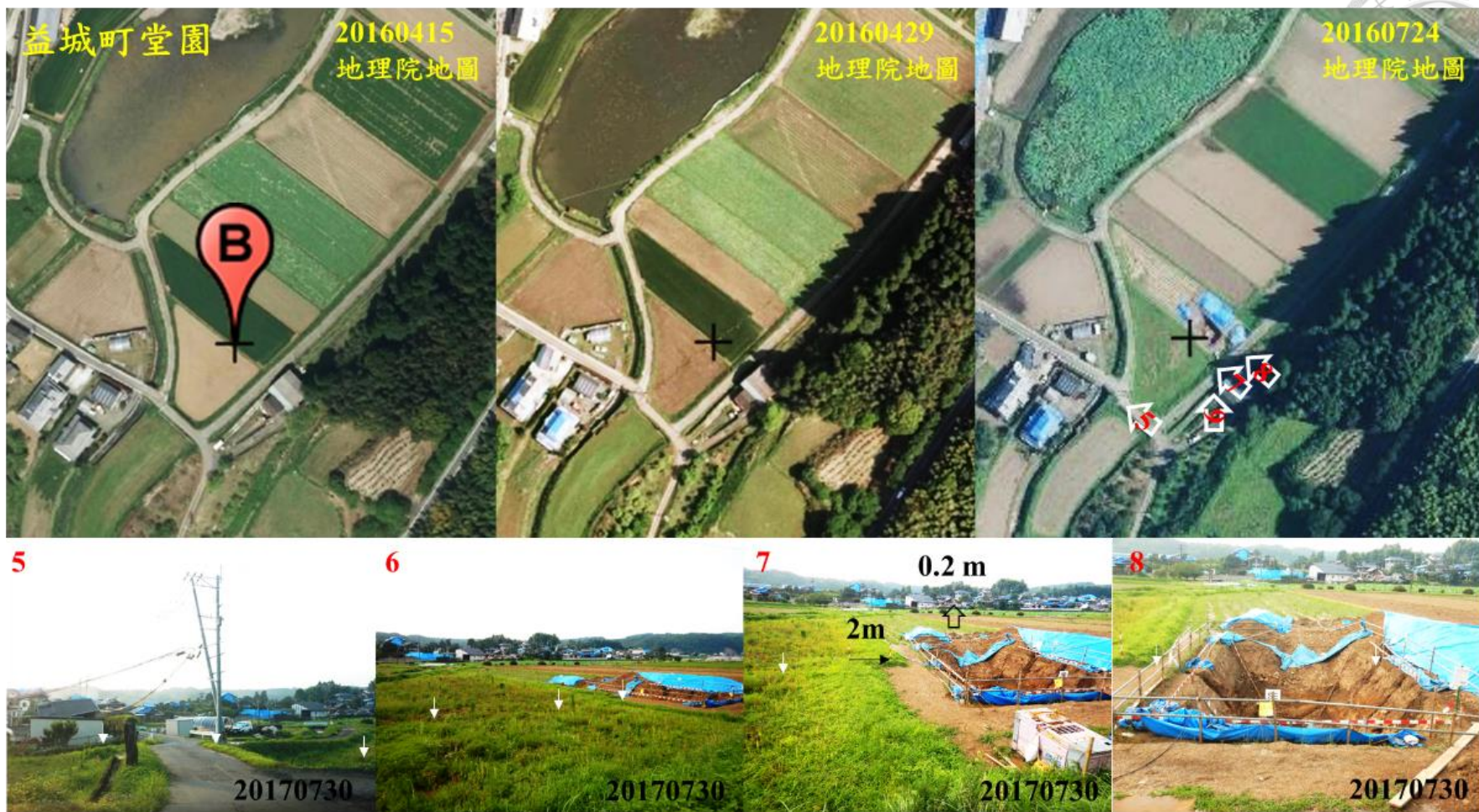


圖 4.6 現地踏勘-堂園(B)，斷層於此區水平錯移約 2 公尺



圖 4.7 現地踏勘-黑川(C)，斷層於此區水平錯移約 0.9 公尺



4.2 斷層特性彙整

可由圖 4.8 的全世界之地震斷層彙整資料觀察，這資料包括 Wells 及 Coppersmith(1994)收錄及 1994 年以後至今收錄(林銘郎 et al. (2014))。由圖中可知歷史地震斷層的最大錯移量及最大地震矩規模皆以橫移斷層為冠，分別為的 12 公尺及規模 8.6，這資料同時突顯了橫移斷層的潛在破壞力及對此類斷層研究的重要性。

選定陳文山 et al. (2010)(表 2.1)台灣 33 條活動斷層參數資料表中，具有最近一次活動時間的斷層，進行彙整，包括獅潭斷層(1935 年)、屯子腳斷層(1935 年)、車籠埔斷層(1999 年)、大茅埔-雙冬斷層(1999 年)、梅山斷層(1906 年)、大尖山斷層(1999 年)、新化斷層(1946 年)、米崙斷層(1951 年)等，整合歷史事件調查，斷層作用後若斷層面出露地表可透過斷層擦痕線理與水平夾角的**滑移角(Rake angle)**表示滑動方向，若未出露地表，則可透過斷層面解反求斷層面滑移方向，將所得滑移量繪圖，如圖 4.9 所示，原點至歷史事件點所形成的夾角，即為滑移角，其中斷層滑移方向顯示多數斷層為逆衝伴隨右移分量。

過去針對斷層事件調查，主要著重於地表影響帶寬，由前述文獻回顧得知，斷層影響帶寬受上覆土層厚度影響，因此蒐集歷史事件調查斷層線型位置所進行的地質鑽井，嘗試彙整斷層上覆土層厚度，又覆土厚度與影響帶寬成正比，因此選定斷層作用後下陷側土層資料紀錄，成果如表 4.2。

表 4.2 歷史地震斷層資料整理

歷史事件	斷層名稱	地震規模	影響帶寬 W (m)	走向滑移 S_y (m)	傾向滑移 S_z (m)	Rake angle (°)	Net slip (m)	覆土厚 H (m)	W/H	S_y/H	S_z/H
1906 年 梅山地震	14.梅山斷層 Meishan F	7.1	450	-2.40	1.80	143	3.00	50	9	-0.05	0.04
1935 年 新竹—台中地震	5.獅潭斷層 Shihtan F	7.1	5	0.00	2.30	90	2.30	10	1	0.00	0.23
1935 年 新竹—台中地震	9.屯子腳斷層 Tuntzuchia F	7.1	100	-1.50	1.00	146	1.80	8	13	-0.19	0.13
1946 年 新化地震	19.新化斷層 Hsinhua F	6.1	100	-2.00	0.76	159	2.14	30	3	-0.07	0.03
1951 年 縱谷地震	26.米崙斷層 Milun F	7.3	100	2.00	1.20	31	2.33	10	10	0.20	0.12
1999 年 集集地震	11.車籠埔斷層-北段 Chelungpu F-N	7.3	350	0.00	6.00	90	6.00	30	12	0.00	0.20
1999 年 集集地震	11.車籠埔斷層-南段 Chelungpu F-S	7.3	100	3.00	2.00	34	3.61	15	7	0.20	0.13
1999 年 集集地震	15.大尖山斷層 Tachianshan F	7.3	100	-1.80	0.70	159	1.93	13	8	-0.14	0.06
1999 Gölcük Earthquake (Turkey)	Gölcük F	7.4	35	-4.00	1.20	163	4.18	8	4	-0.50	0.15
2010 Darfield earthquake (Canterbury, New Zealand)	Greendale F	7.1	300	-5.40	1.25	167	5.54	80	4	-0.07	0.02
2016 Kumamoto Earthquake (Japan)	布田川・日奈久斷層 Futagawa-Hinagu FZ	7.3	100	-3.30	-1.15	-161	3.50	13	8	-0.25	-0.09

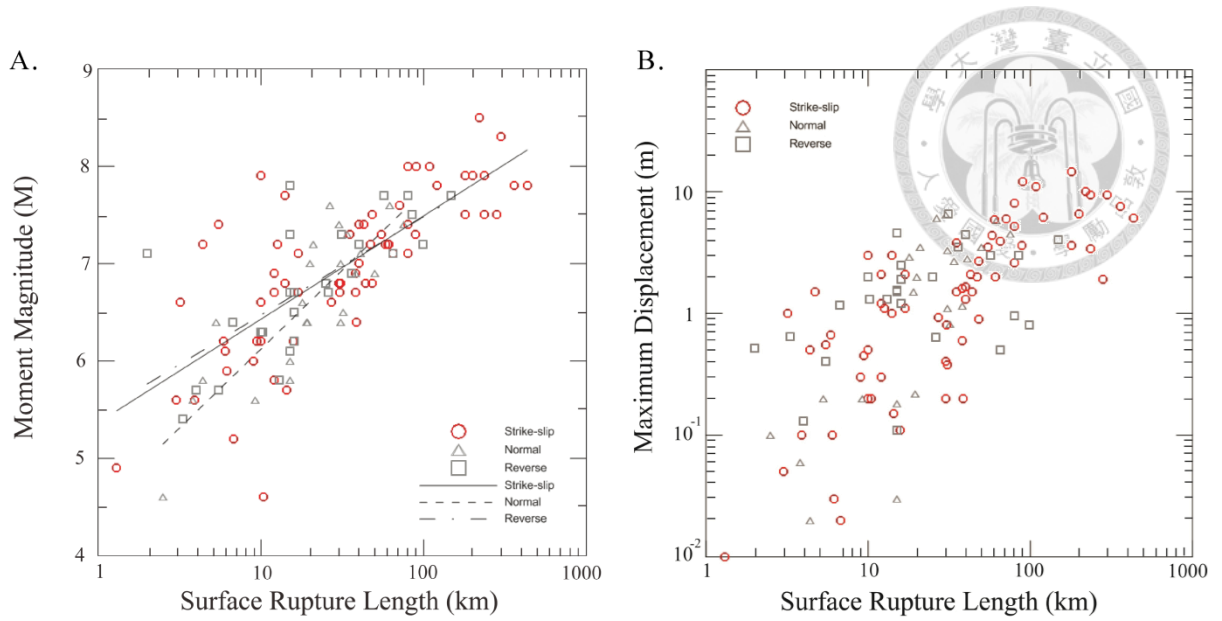


圖 4.8 歷史地震斷層彙整資料

(A.歷史地震斷層地表破裂長度與最大位移量 B.歷史地震斷層地表破裂長度與地震矩規模)

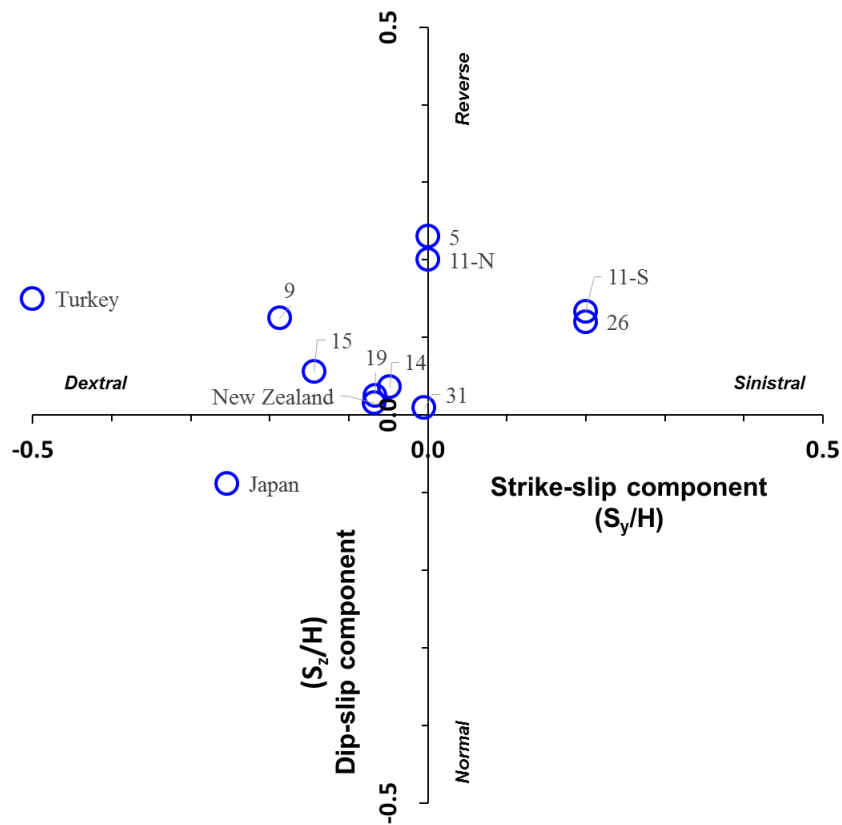


圖 4.9 歷史事件滑移量分布圖

第5章 砂箱試驗成果

為瞭解斷層作用下不同滑移角及滑移比對上覆土層變形影響，本研究簡化假設斷層傾角 90° ，針對滑移角、基盤滑移比及覆土厚度等，共設計八組不同條件之試驗(圖 5.1)，各組試驗中分段紀錄(圖 5.2)不同滑移比之地表數值高程，並於最後階段選定剖面觀察，如表 5.1 所示，共分為三種斷層類型，走向滑移(Strike-slip)、斜向滑移(Oblique-slip)及傾向滑移(Dip-slip)，試驗編號 m1r0 (model 1 result 0)為模型 1 第 0 階段。首先進行重複性試驗，初步研討地表影響範圍之一致性，後續針對近似(approximation)程度分別探討 1.地貌分布、2.高程差異所造成的地表線形(破裂跡)特徵、3.地表指準線分析及斷層擴展距離比等地表影響範圍、4.山丘地貌坡向分析、5.土中斷層面及隨深度的變化、6.覆土厚度影響，等六項觀察重點。

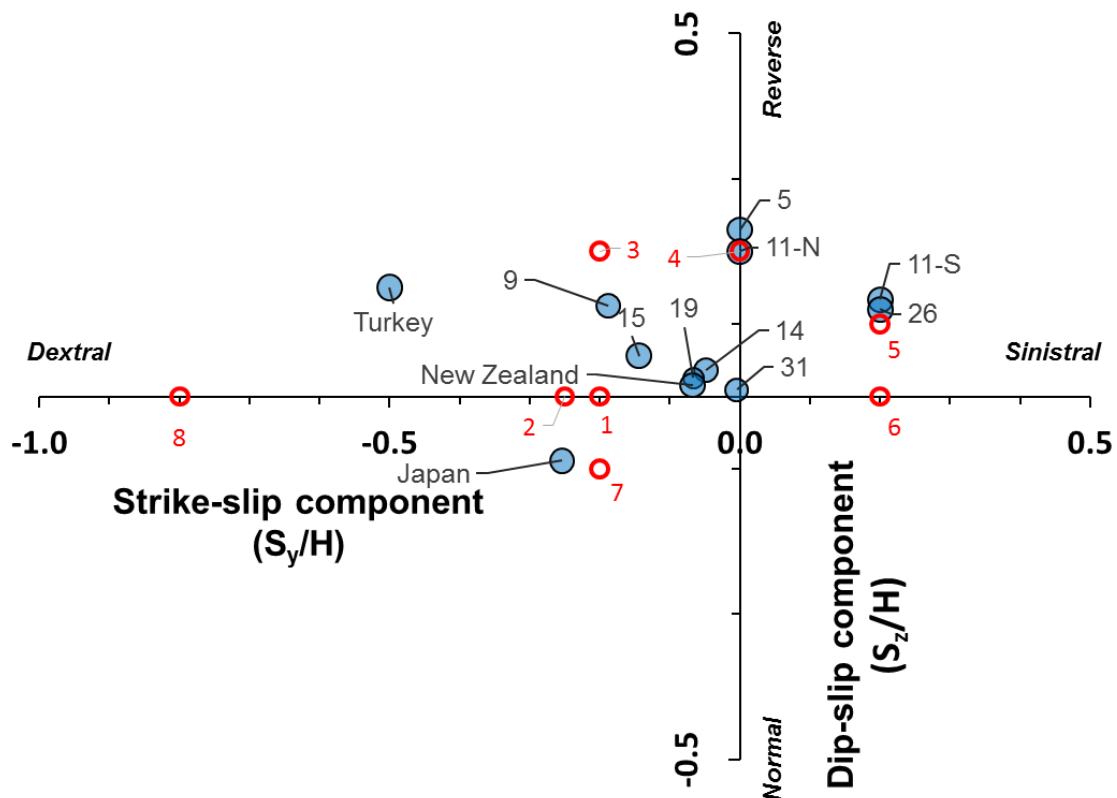


圖 5.1 模型規劃

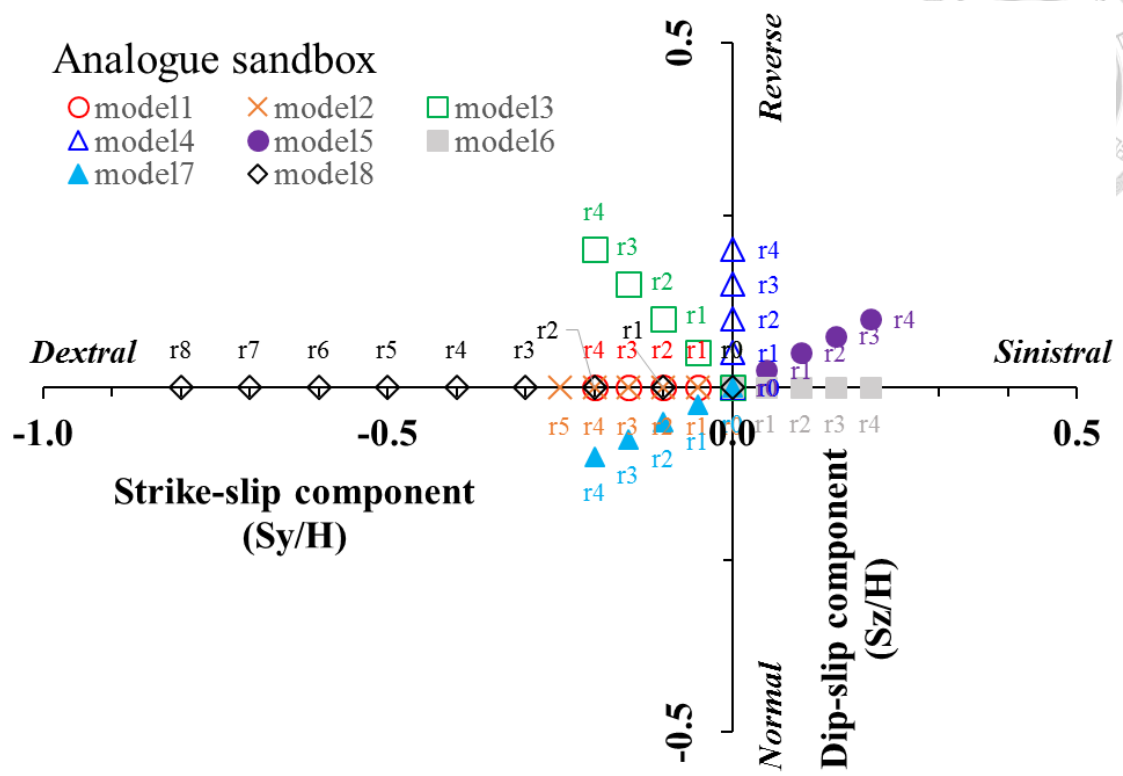


圖 5.2 各階段試驗代號

表 5.1 試驗規劃表

Fault type	model	覆土厚 H (mm)	走向滑移量 S_y (mm)	S_y/H	傾向滑移量 S_z (mm)	S_z/H	Rake angle (°)	Net slip (mm)	S/H
Strike-slip	m1r0	100	0	0.00	0	0.00	0	0.0	0.00
	m1r1	100	5	-0.05	0	0.00	180	5.0	0.05
	m1r2	100	10	-0.10	0	0.00	180	10.0	0.10
	m1r3	100	15	-0.15	0	0.00	180	15.0	0.15
	m1r4	100	20	-0.20	0	0.00	180	20.0	0.20
	m2r0	100	0	0.00	0	0.00	0	0.0	0.00
	m2r1	100	5	-0.05	0	0.00	180	5.0	0.05
	m2r2	100	10	-0.10	0	0.00	180	10.0	0.10
	m2r3	100	15	-0.15	0	0.00	180	15.0	0.15
	m2r4	100	20	-0.20	0	0.00	180	20.0	0.20
Oblique-slip	m3r0	100	0	0.00	0	0.00	0	0.0	0.00
	m3r1	100	5	-0.05	5	0.05	135	7.1	0.07
	m3r2	100	10	-0.10	10	0.10	135	14.1	0.14
	m3r3	100	15	-0.15	15	0.15	135	21.2	0.21
	m3r4	100	20	-0.20	20	0.20	135	28.3	0.28
Dip-slip	m4r0	100	0	0.00	0	0.00	0	0.0	0.00
	m4r1	100	0	0.00	5	0.05	90	5.0	0.05
	m4r2	100	0	0.00	10	0.10	90	10.0	0.10
	m4r3	100	0	0.00	15	0.15	90	15.0	0.15
	m4r4	100	0	0.00	20	0.20	90	20.0	0.20
Oblique-slip	m5r0	100	0	0.00	0	0.00	0	0.0	0.00
	m5r1	100	-5	0.05	2.5	0.03	27	5.6	0.06
	m5r2	100	-10	0.10	5	0.05	27	11.2	0.11
	m5r3	100	-15	0.15	7.5	0.08	27	16.8	0.17
	m5r4	100	-20	0.20	10	0.10	27	22.4	0.22
Strike-slip	m6r0	100	0	0.00	0	0.00	0	0.0	0.00
	m6r1	100	-5	0.05	0	0.00	0	5.0	0.05
	m6r2	100	-10	0.10	0	0.00	0	10.0	0.10
	m6r3	100	-15	0.15	0	0.00	0	15.0	0.15
	m6r4	100	-20	0.20	0	0.00	0	20.0	0.20
Oblique-slip	m7r0	100	0	0.00	0	0.00	0	0.0	0.00
	m7r1	100	5	-0.05	-2.5	-0.03	-153	5.6	0.06
	m7r2	100	10	-0.10	-5	-0.05	-153	11.2	0.11
	m7r3	100	15	-0.15	-7.5	-0.08	-153	16.8	0.17
	m7r4	100	20	-0.20	-10	-0.10	-153	22.4	0.22
Strike-slip	m8r0	50	0	0.00	0	0.00	0	0.0	0.00
	m8r1	50	5	-0.10	0	0.00	180	5.0	0.10
	m8r2	50	10	-0.20	0	0.00	180	10.0	0.20
	m8r3	50	15	-0.30	0	0.00	180	15.0	0.30
	m8r4	50	20	-0.40	0	0.00	180	20.0	0.40
	m8r5	50	25	-0.50	0	0.00	180	25.0	0.50
	m8r6	50	30	-0.60	0	0.00	180	30.0	0.60
	m8r7	50	35	-0.70	0	0.00	180	35.0	0.70
	m8r8	50	40	-0.80	0	0.00	180	40.0	0.80



5.1 重複性試驗

參考 [Hornblow et al. \(2014\)](#) 於地震事件後的現地調查，利用現地既有人為界線，統計據斷層遠近的錯位量，以利瞭解斷層主要影響範圍(圖 5.3)。本研究於斷層傾角 90° 及覆土厚 10 公分時，進行砂箱平移的重複性試驗，分別為滑移角 180° ，總滑移量達 20 毫米(模型 1)及 25 毫米(模型 2)的右移系統。

砂箱試驗時鋪設地表指準層，於各試驗階段進行地表正射影像指準層數化，統計單一指準層鄰近兩點的相對錯位量(y_{ni} 、 z_{ni})，根據距離斷層投影線位置繪製於圖，分別統計走向滑移、傾向滑移及斜向滑移模型，以了解滑移角與影響範圍關係([Chan et al. \(2016\)](#))。

走向滑移影響範圍採用模型 1 進行分析，結果如圖 5.4 所示，地表相對錯移量隨距斷層遠近呈鐘形分布，由常態分佈曲線擬合的平均數得知斷層影響範圍是否有偏態，而標準差得知影響範圍寬度，當 y 方向滑移量(S_y/H)由 -0.15 發展至 -0.25，平均數由 0.005 m 至 0.004 m，與斷層投影線位置(0.00)相距不遠，未有偏態現象，標準差由 0.046 m 降至 0.028 m，顯示主要影響範圍並未明顯擴大。

走向滑移影響範圍採用模型 2 進行分析，結果如圖 5.5 所示，當 y 方向滑移量(S_y/H)由 -0.15 發展至 -0.25，平均數由 0.015 m 至 0.008 m，未有偏態現象，標準差由 0.044 m 降至 0.027 m，顯示主要影響範圍並未明顯擴大。

由模型 1 及模型 2 結果顯示地表破裂跡影響帶寬，約在斷層投影線兩側 15 公分，而滑移量增加時，影響帶寬範圍更為集中，兩組模型趨勢一致，持續進行後續分析討論。

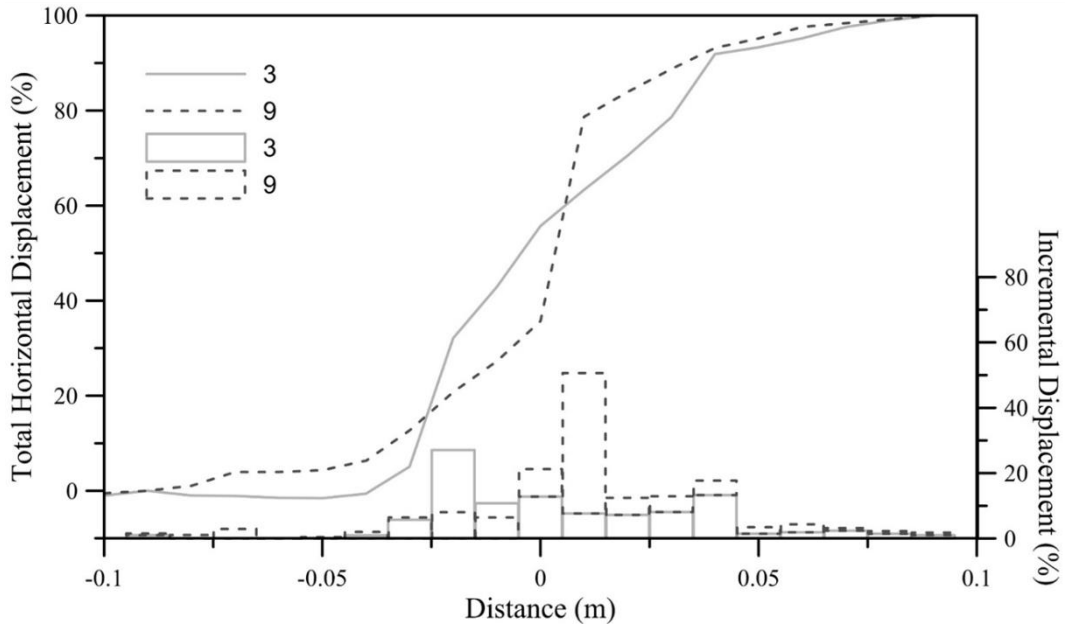
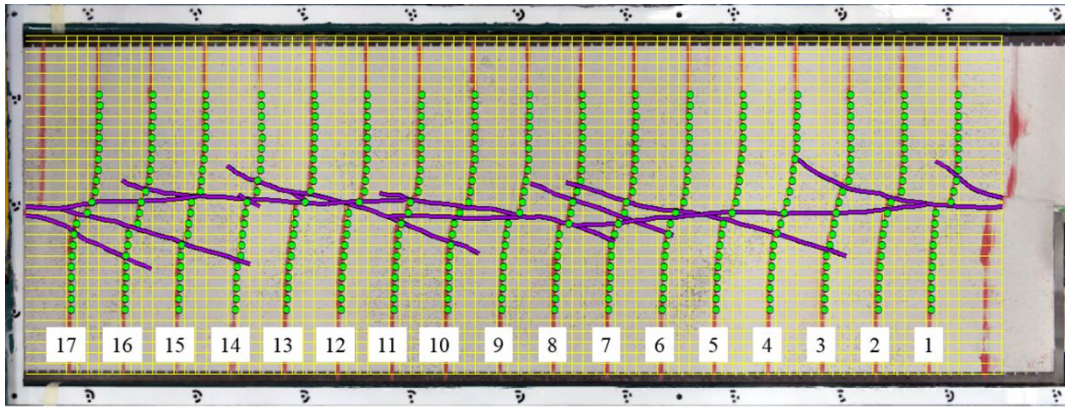


圖 5.3 地表指準層方法學

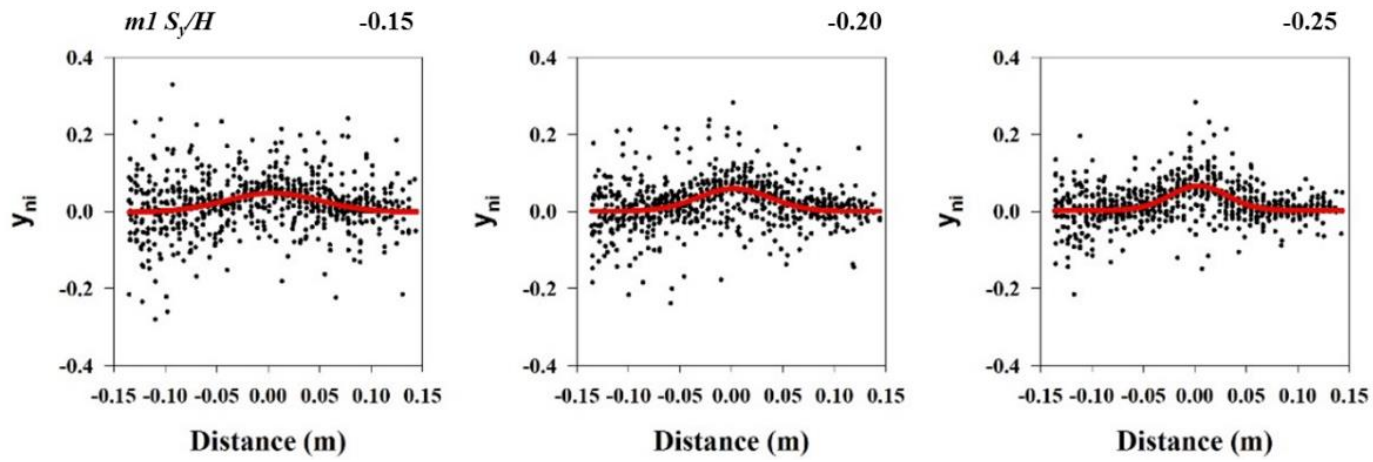


圖 5.4 模型 1 影響範圍討論

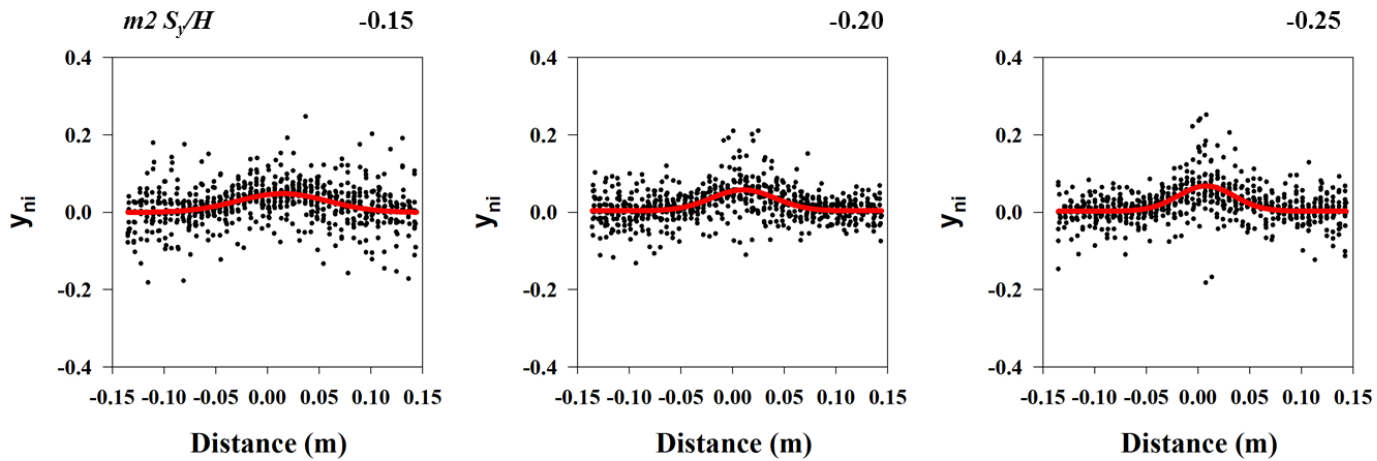


圖 5.5 模型 2 影響範圍討論

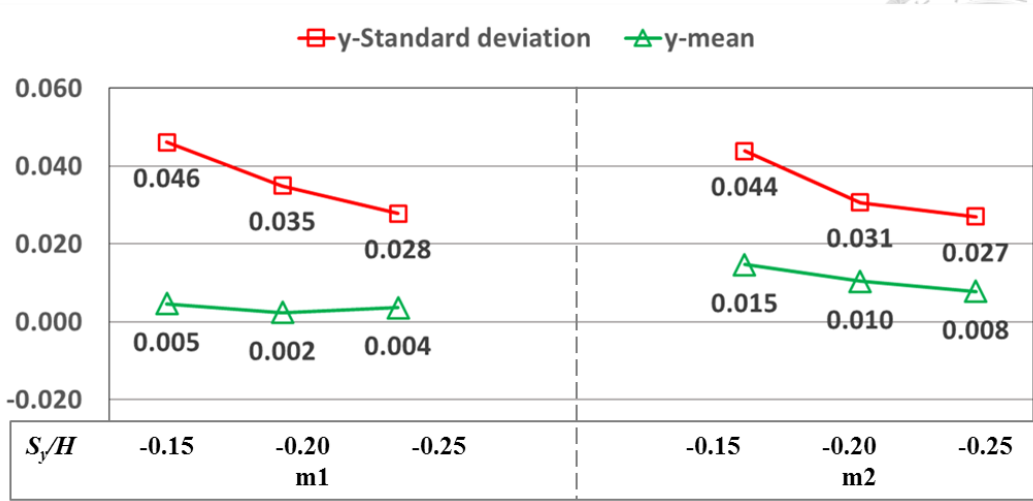


圖 5.6 重複性試驗影響範圍



5.2 地貌分布

無論是現地調查或是砂箱試驗，地表破裂跡所勾勒的地貌分布屬於一次近似 (approximation of first degree)，為最顯著觀察的項目，因此本研究優先說明各模型錯動歷程的地貌分布，礙於篇幅，內文中圖示以純平移(模型 1)、純抬升(模型 4)及斜移(模型 3)為主，完整試驗成果圖示詳附錄 A。

模型 1 條件為覆土厚 10 公分，純水平滑移量(S_y)達 20 毫米的右移系統，由圖 5.7 顯示，滑移量增加過程中地表隆起數個山丘(Hill)及雁型排列的鞍部(Saddle)，山丘位置與高程變化可由等高線圖瞭解(圖 5.8)，初始平均高程為 0.00 毫米，標準差為 0.61 毫米，當滑移比(S/H)達 0.1 時，地表逐漸形成山丘地形，最高高程達 4.05 毫米，滑移比達 0.15 時，由等高線圈合可辨別地表形成三個山丘，最高高程達 5.22 毫米，且出現兩鞍部，呈雁型排列，滑移比達 0.2 時，地表形成四個山丘，最高高程達 5.83 毫米，且新增一鞍部於砂箱中段。

模型 2 條件為覆土厚 10 公分，純水平滑移量(S_y)達 25 毫米的右移系統，滑移量增加過程中地表亦隆起數個山丘及雁型排列的鞍部，山丘位置與高程變化可由等高線圖瞭解，初始平均高程為 0.00 毫米，標準差為 0.21 毫米，當滑移比(S/H)達 0.1 時，地表逐漸形成山丘地形，最高高程達 2.15 毫米，滑移比達 0.15 時，地表形成三個山丘，最高高程達 3.06 毫米，且出現三鞍部，呈雁型排列，滑移比達 0.2 時，地表形成四個山丘，最高高程達 3.73 毫米，且新增一鞍部於砂箱中段，滑移比達 0.25 時，地表維持四個山丘，最高高程達 4.54 毫米。

模型 3 條件為覆土厚 10 公分，水平滑移量 20 毫米及垂直抬升量 20 毫米的斜移系統，由圖 5.9 顯示，滑移量增加過程中，右側砂盒抬升顯著影響山崖線型偏向左側，崖線位置與高程變化可由等高線圖瞭解(圖 5.10)，初始平均高程為 0.00 毫米，標準差為 1.27 毫米，當滑移比(S/H)達 0.07 時，右側砂盒抬升形成一個向左的斜坡貫穿整個砂盒，最高高程達 8.78 毫米，滑移比達 0.14 時，向左之斜坡面上呈




現雁型排列之鞍部，最高高程維持在抬升盒，達 13.14 毫米，滑移比達 0.21 時，坡面冠部線形顯著並略呈雁型排列，最高高程為 18.61 毫米，滑移比達 0.28 時，坡面冠部線形連貫，最高高程為 22.95 毫米。

模型 4 條件為覆土厚 10 公分，垂直抬升量 20 毫米的抬升系統，由圖 5.11 顯示，右側砂盒抬升顯著影響山崖線型偏向左側，崖線位置與高程變化可由等高線圖瞭解(圖 5.12)，初始平均高程為 0.00 毫米，標準差為 0.49 毫米，當滑移比(S/H)達 0.10 時，地形呈現一個向左的斜坡貫穿整個砂盒，最高高程達 10.82 毫米，滑移比達 0.15 時，坡面趾部崖線顯著，最高高程維持在抬升盒，達 14.90 毫米，滑移比達 0.20 時，坡面冠部崩崖線形，最高高程為 20.62 毫米。

模型 5 條件為覆土厚 10 公分，水平滑移量 20 毫米及垂直抬升量 10 毫米的斜移系統，滑移量增加過程中，地表呈現數道雁型排列的鞍部，但因右側砂盒抬升影響線型偏向左側，高程變化可由等高線圖瞭解，初始平均高程為 0.00 毫米，標準差為 0.31 毫米，當滑移比(S/H)達 0.06 時，右側砂盒抬升形成一個向左的斜坡貫穿整個砂盒，最高高程達 3.77 毫米，滑移比達 0.11 時，向左之斜坡面上呈現四道雁型排列之鞍部，最高高程維持在抬升盒，達 7.12 毫米，滑移比達 0.17 時，鞍部線形更為顯著，最高高程為 9.86 毫米，滑移比達 0.22 時，鞍部線形從坡頂沿伸至趾部，最高高程為 13.13 毫米。

模型 6 條件為覆土厚 10 公分，純水平滑移量(S_y)達 20 毫米的左移系統，滑移量增加過程中地表亦隆起數個山丘及雁型排列的鞍部，山丘位置與高程變化可由等高線圖瞭解，初始平均高程為 0.00 毫米，標準差為 0.36 毫米，當滑移比(S/H)達 0.1 時，地表逐漸形成二個山丘，最高高程達 3.28 毫米，且出現二鞍部，呈雁型排列，滑移比(S/H)達 0.15 時，地表形成三個山丘，最高高程達 4.64 毫米，且共有四鞍部，滑移比(S/H)達 0.2 時，地表維持四個山丘，最高高程為 4.33 毫米，鞍部線型更加顯著。



模型 7 條件為覆土厚 10 公分，水平滑移量 20 毫米及垂直陷落量 10 毫米的斜移系統，滑移量增加過程中，地表呈現數道雁型排列的鞍部，但因右側砂盒陷落影響線型偏向右側，高程變化可由等高線圖瞭解，初始平均高程為 0.00 毫米，標準差為 1.08 毫米，當滑移比(S/H)達 0.06 時，右側砂盒陷落形成一個向右的斜坡貫穿整個砂盒，最低高程為-5.08 毫米，滑移比達 0.11 時，向右之斜坡面上呈現五道雁型排列之鞍部，最低高程維持在陷落盒，為-10.47 毫米，滑移比達 0.17 時，鞍部線形更為顯著，但角度轉向較為平行坡面，最低高程為-9.28 毫米，滑移比達 0.22 時，鞍部線形從坡頂沿伸至趾部，最低高程為-13.75 毫米。

模型 8 條件為覆土厚 5 公分，純水平滑移量(S_y)達 40 毫米的右移系統，滑移量增加過程中地表亦隆起數個山丘及雁型排列的鞍部，山丘位置與高程變化可由等高線圖瞭解，初始平均高程為 0.00 毫米，標準差為 0.60 毫米，當滑移比(S/H)達 0.2 時，地表逐漸形成五個山丘地形，最高高程達 3.71 毫米，滑移比達 0.30 時，地表形成六個山丘，且出現數條鞍部呈雁型排列，最高高程達 4.12 毫米，滑移比達 0.4 時，新增一鞍部於砂箱中段，最高高程達 5.66 毫米，持續增加滑移比達 0.40 時，平行斷層走向的鞍部更為顯著，且連續性幾乎貫穿整個砂盒，最高高程為 4.82 毫米。

以上八組試驗，為瞭解砂盒中砂體鋪設的平整度，計算未錯動狀態下的平均高程及標準差，整體平均高程皆落在 0.00 毫米，而地表因鋪設指準層，故標準差最大為模型 3 的 1.27 毫米，但模型 3 於試驗初期即進行 5 毫米的基盤抬昇，因此高差分析並不受影響。

單就平移模型地表高程討論(圖 5.13)，結果顯示錯動初期，平均地表高程隆起顯著變化，結合等高線觀察，滑移比達 0.15 時地貌形成丘谷地形，而後期再錯動，對既有地形高程差異不大。

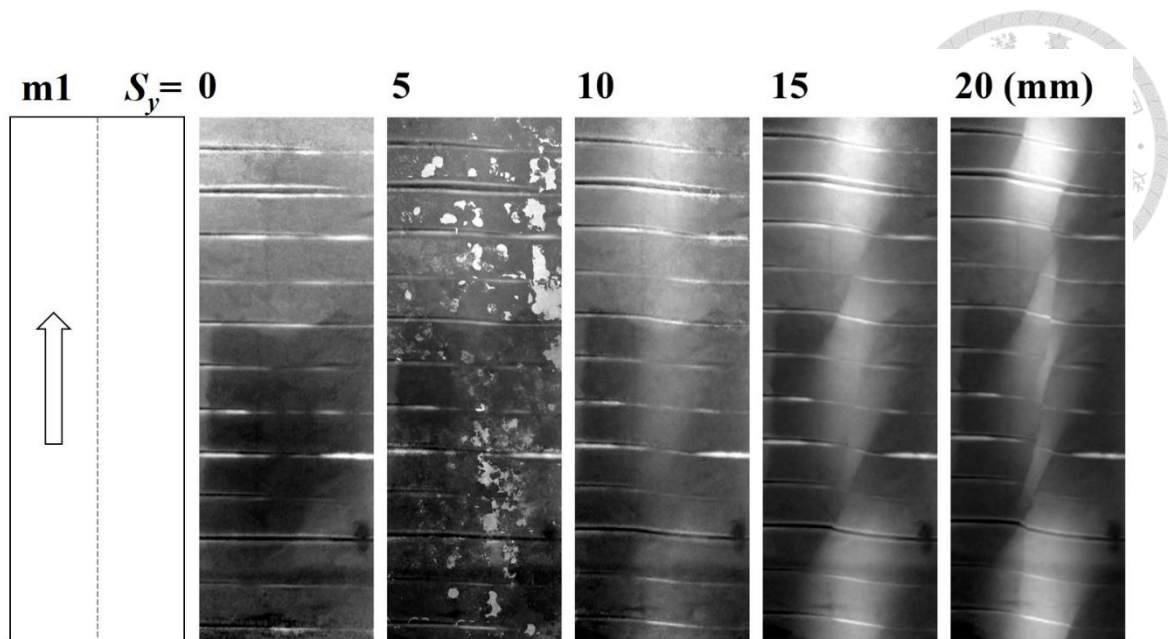


圖 5.7 走向滑移(m1)地形演育

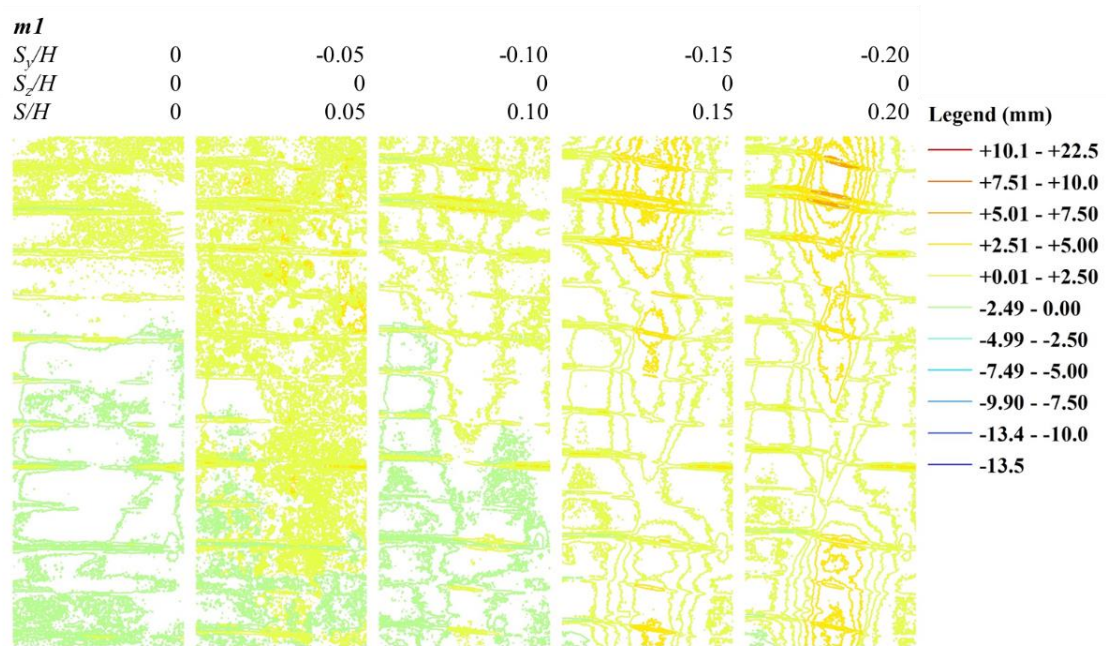


圖 5.8 走向滑移(m1)等高線圖

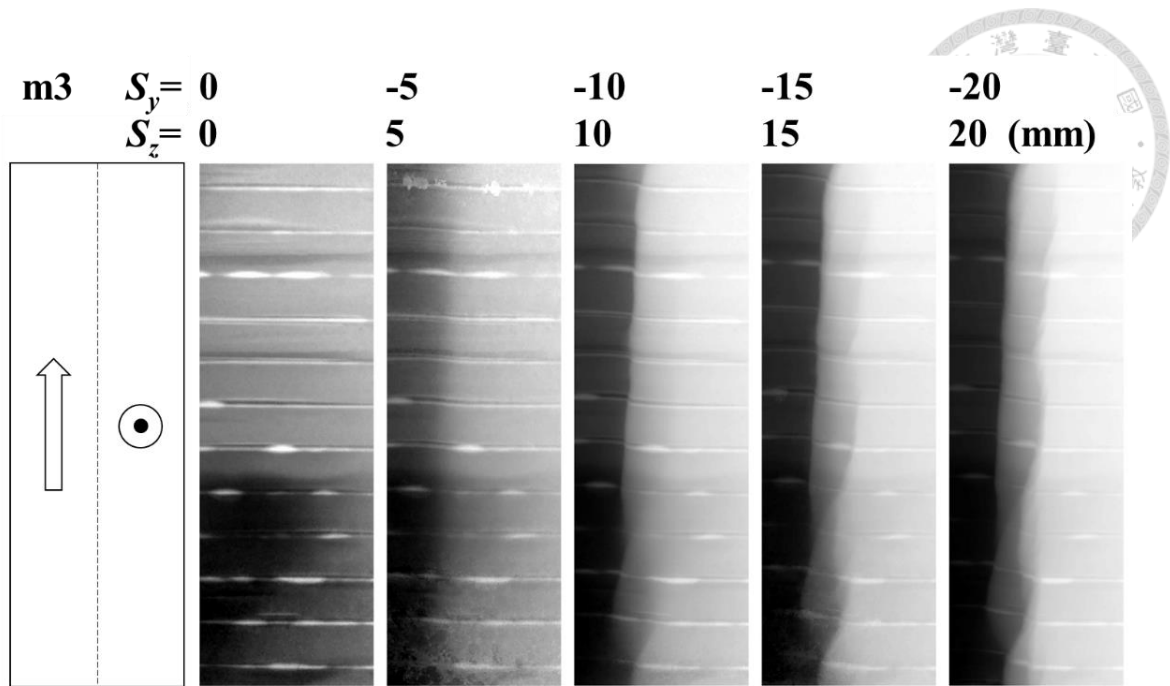


圖 5.9 斜向滑移(m3)地形演育

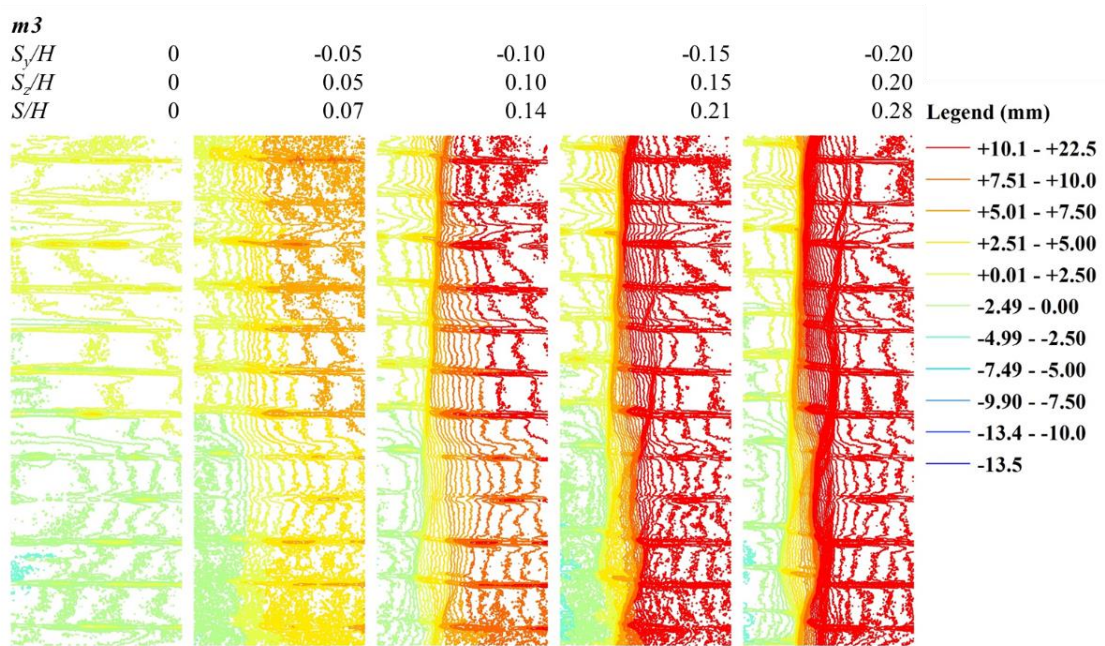


圖 5.10 走向滑移(m3)等高線圖

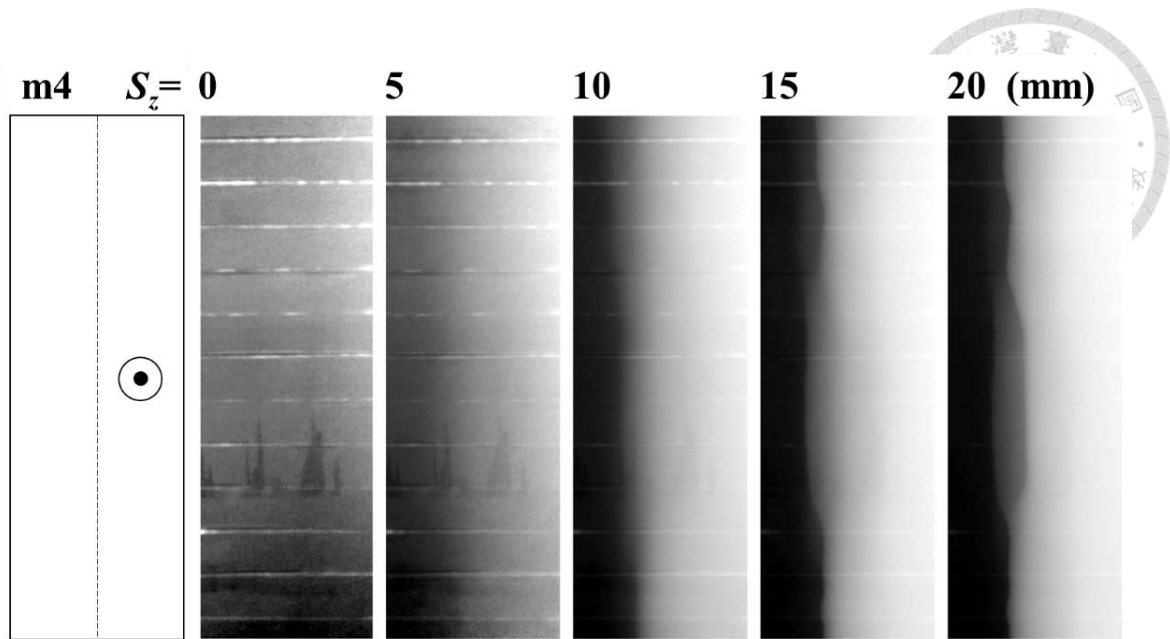


圖 5.11 傾向滑移(m4)地形演育

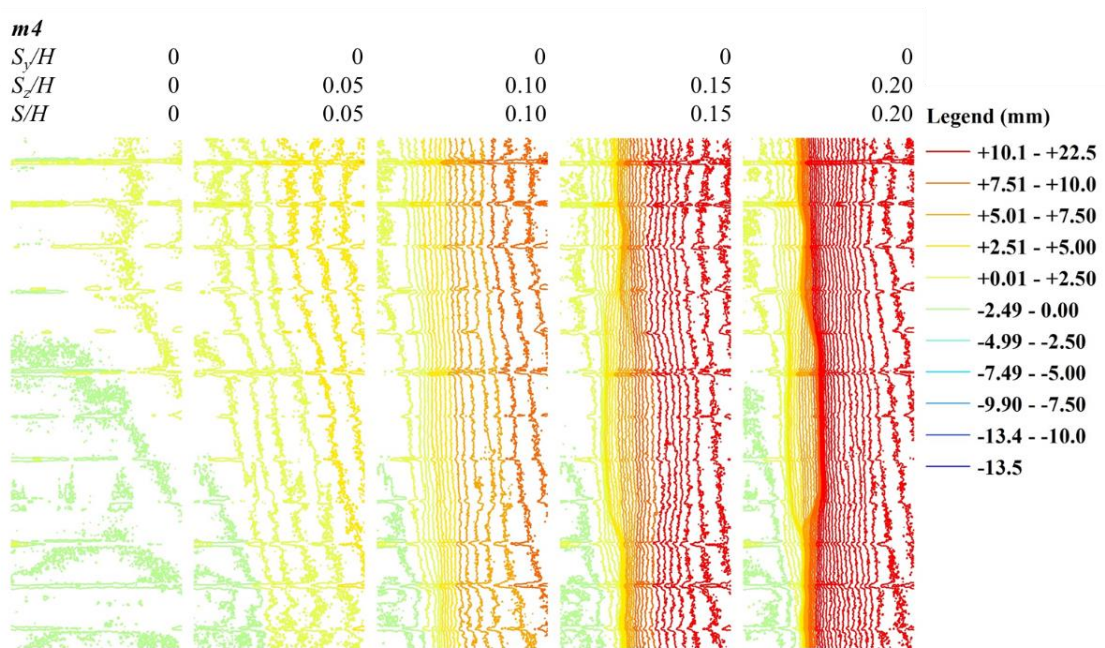


圖 5.12 走向滑移(m4)等高線圖

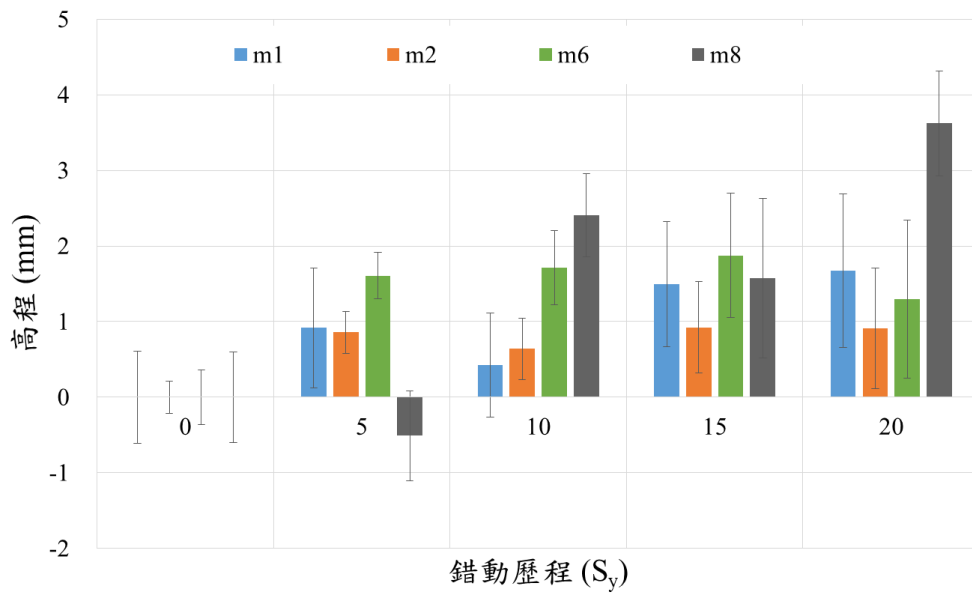
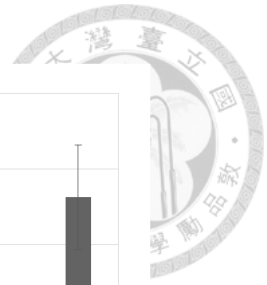


圖 5.13 平移斷層砂箱模擬地表高程討論



5.3 地表線形

參考 Naylor et al. (1986) 利用俯視圖描繪地表線形，判釋線形可用地形高差，透過數值地形高程產製日照陰影圖，日照方向採方位角及高度為 270 度及 45 度，強化地形高差特徵，並目視數化地表線形，透過不同滑移階段的地表線形，區分新生破裂跡(Active rupture)及舊有破裂跡(Inactive rupture)。各別統計地表新生破裂跡的發展長度比與基盤斷層面夾角，其中發展長度比為地表新生破裂跡線段總和除以覆土厚度。

模型 1 各階段地表線形如圖 5.14 顯示，當滑移比(S/H)達 0.15 時，新生破裂跡長度比為 8.4，基盤斷層面夾角主要為 16° 及 26° 兩組，滑移比達 0.20 時，長度比為 1.8，基盤斷層面夾角主要為 -20° 、 0° 及 10° 三組。

模型 2 各階段地表線形顯示，當滑移比(S/H)達 0.15 時，新生破裂跡長度比為 6.2，基盤斷層面夾角主要為 12° 及 22° 兩組，滑移比達 0.20 時，長度比為 5.1，基盤斷層面夾角主要為 10° 及 20° 兩組，滑移比達 0.25 時，長度比為 4.0，基盤斷層面夾角主要為 3° 。

模型 3 各階段地表線形如圖 5.15 顯示，當滑移比(S/H)達 0.14 時，新生破裂跡長度比為 6.1，基盤斷層面夾角主要為 4° 及 14° 兩組，滑移比達 0.21 時，長度比為 5.0，基盤斷層面夾角主要為 16° ，滑移比達 0.28 時，長度比為 5.8，基盤斷層面夾角主要為 4° 及 -29° 兩組。

模型 4 各階段地表線形如圖 5.16 顯示，當滑移比(S/H)達 0.10 時，新生破裂跡長度比為 1.3，基盤斷層面夾角主要為 -1° ，滑移比達 0.15 時，長度比為 4.9，基盤斷層面夾角主要為 -3° 及 23° 兩組，滑移比達 0.20 時，長度比為 2.2，基盤斷層面夾角主要為 -1° 。

模型 5 各階段地表線形顯示，當滑移比(S/H)達 0.06 時，新生破裂跡長度比為 5.8，基盤斷層面夾角主要為 -13° 及 -25° 兩組，滑移比達 0.11 時，長度比為 3.8，基



盤斷層面夾角主要為 -12° 及 2° 兩組，滑移比達 0.22 時，長度比為 3.6，基盤斷層面夾角主要為 -14° 及 0° 兩組。

模型 6 各階段地表線形顯示，當滑移比(S/H)達 0.10 時，新生破裂跡長度比為 2.5，基盤斷層面夾角主要為 -25° ，滑移比達 0.15 時，長度比為 4.9，基盤斷層面夾角主要為 -17° 及 -11° 兩組，滑移比達 0.20 時，長度比為 5.0，基盤斷層面夾角主要為 -4° 及 -32° 兩組。

模型 7 各階段地表線形顯示，當滑移比(S/H)達 0.11 時，新生破裂跡長度比為 3.9，基盤斷層面夾角主要為 19° ，滑移比達 0.17 時，長度比為 4.8，基盤斷層面夾角主要為 19° 及 7° 兩組，滑移比達 0.22 時，長度比 3.6，基盤斷層面夾角主要為 6° 、 14° 及 31° 兩組。

模型 8 各階段地表線形顯示，當滑移比(S/H)達 0.20 時，新生破裂跡長度比為 14.9，基盤斷層面夾角主要為 13° 及 4° 兩組，滑移比達 0.30 時，長度比為 7.1，基盤斷層面夾角主要為 13° 及 6° 兩組，滑移比達 0.40 時，長度比 5.7，基盤斷層面夾角主要為 0° ，滑移比達 0.50 時，長度比 4.6，基盤斷層面夾角主要為 -2° ，滑移比達 0.60 時，長度比 0.3，與基盤斷層面夾角主要為 6° ，滑移比達 0.70 時，長度比 1.9，與基盤斷層面夾角主要為 -12° 及 21° 兩組，滑移比達 0.80 時，長度比 5.0，與基盤斷層面夾角主要為 -5° 。

模型 8 為覆土厚 5 公分，而其他模型為覆土厚 10 公分，當滑移比增加時，地表線形的角度會到達一個峰值後下降(圖 5.17)，而角度最大值約坐落在滑移比 0.2 時，顯示地表影響範圍在此時達到最大，根據砂箱試驗統計，最大影響範圍時，基盤斷層面與新生破裂跡夾角約 ± 40 度。利用覆土厚度正規化地表新生破裂跡長度，地表破裂跡長度比亦有一峰值(圖 5.18)，當滑移比大於 0.2 時，破裂跡長度比下降，顯示地表破裂跡沿伸長度較短，而使用覆土厚度正規化可顯著觀察此趨勢。

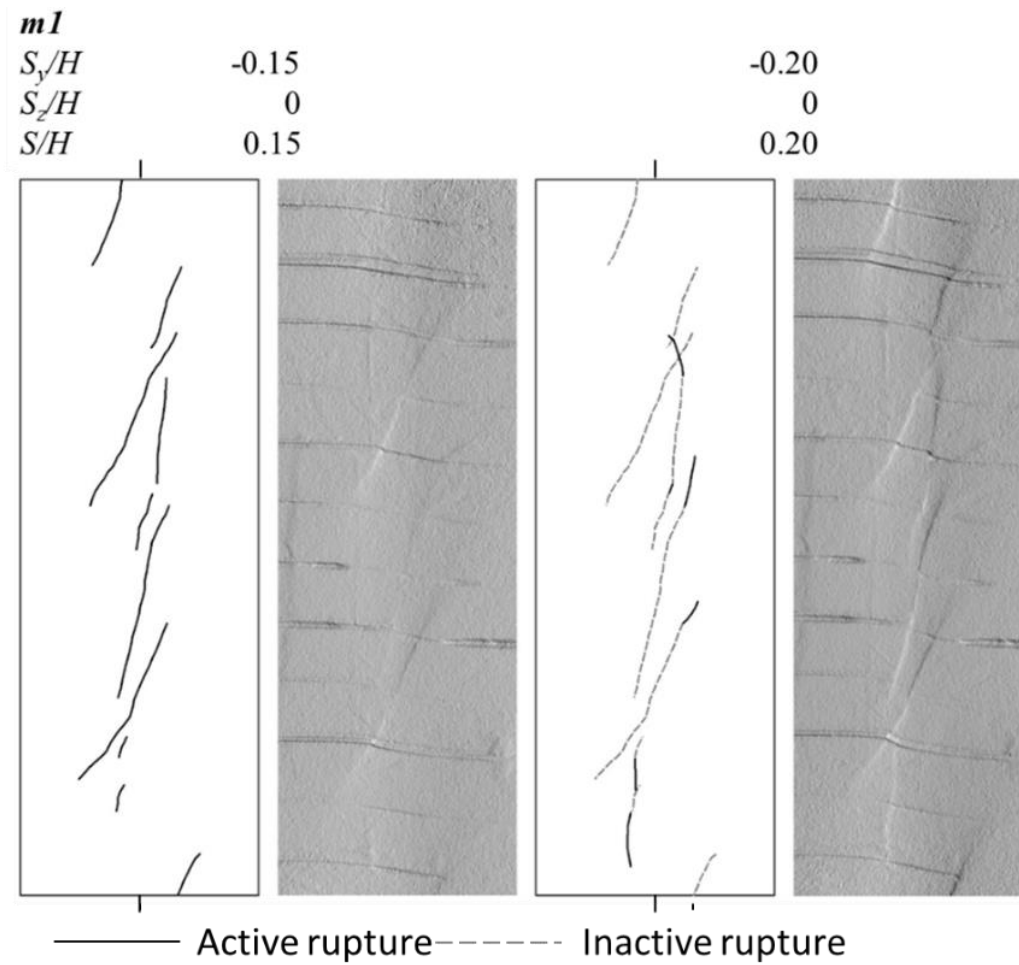


圖 5.14 模型 1 地表線形

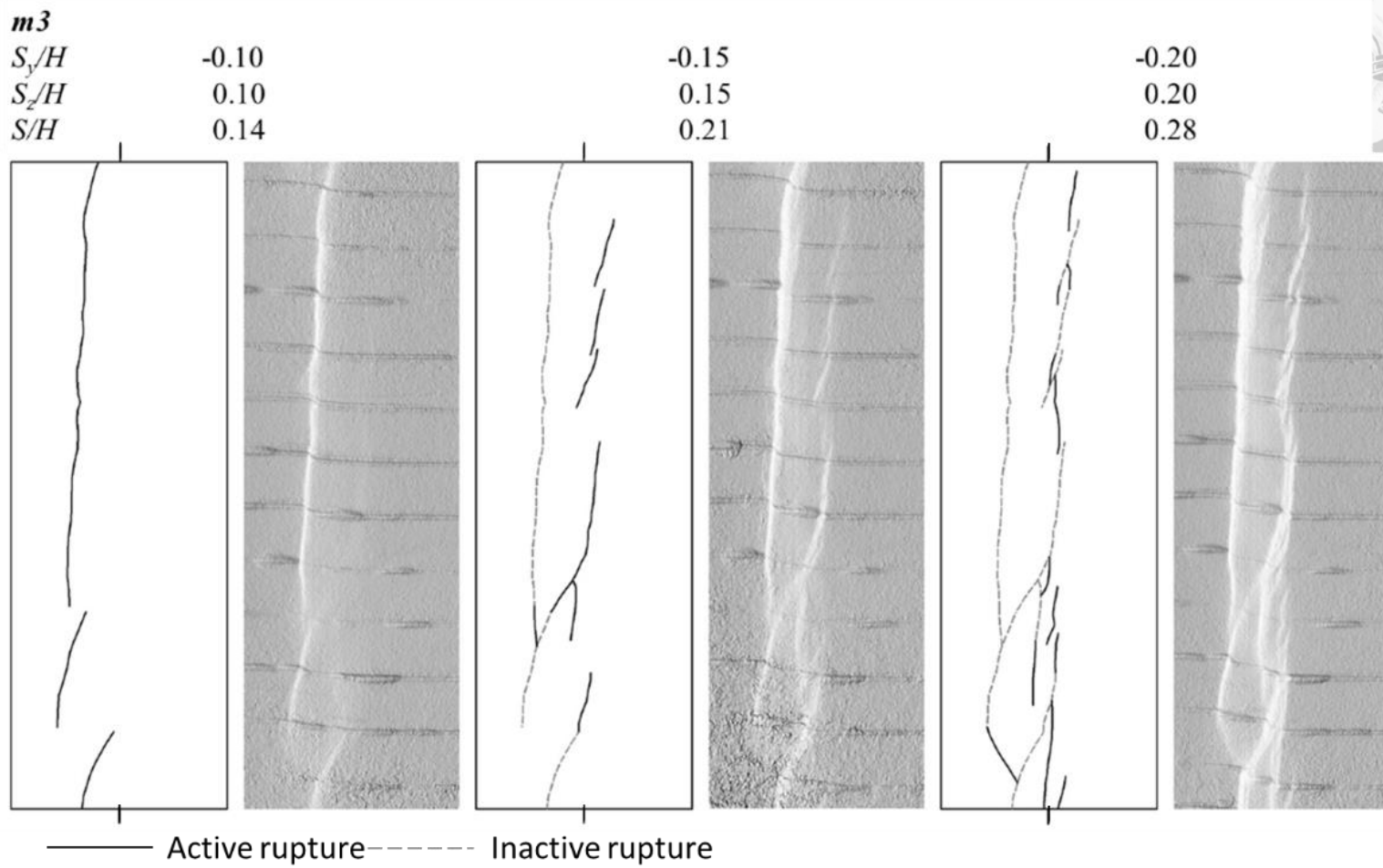


圖 5.15 模型 3 地表線形

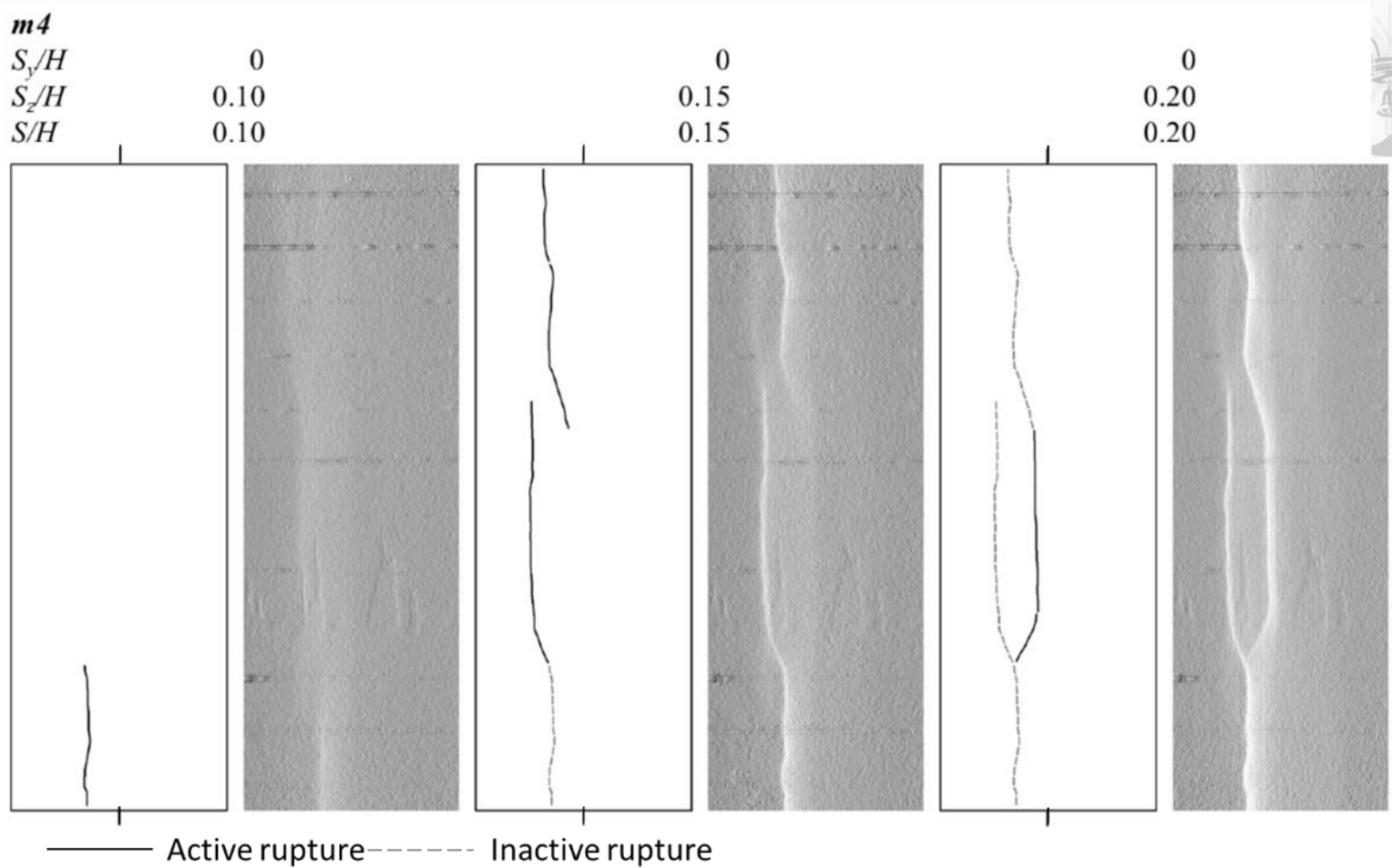


圖 5.16 模型 4 地表線形

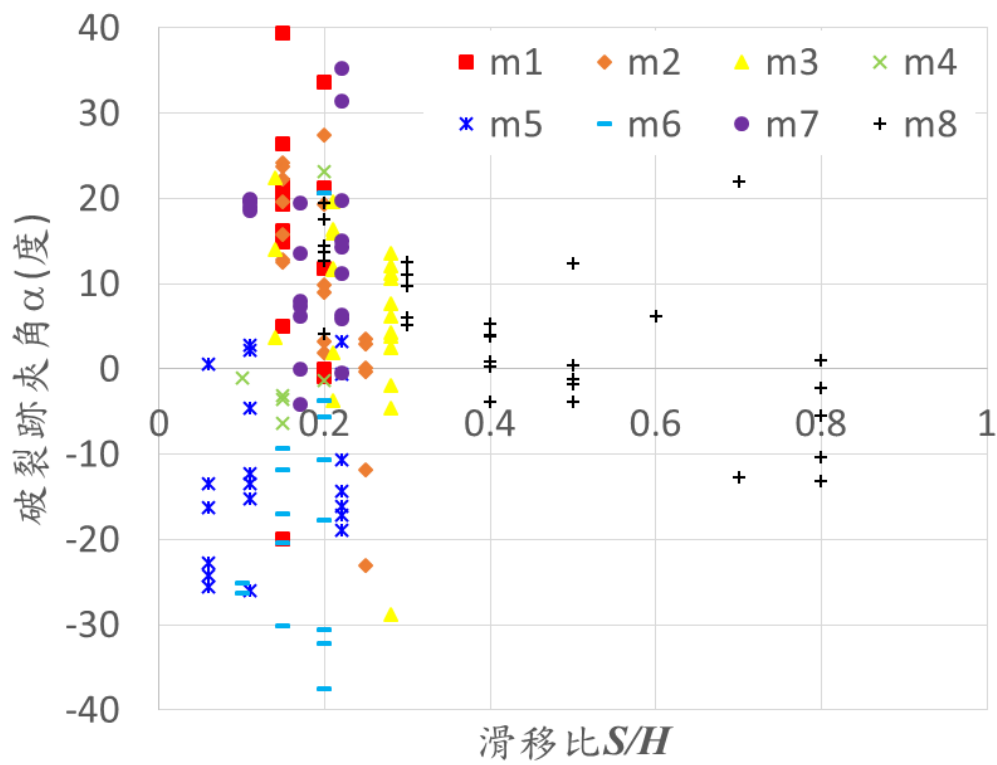


圖 5.17 地表線形角度與滑移比關係

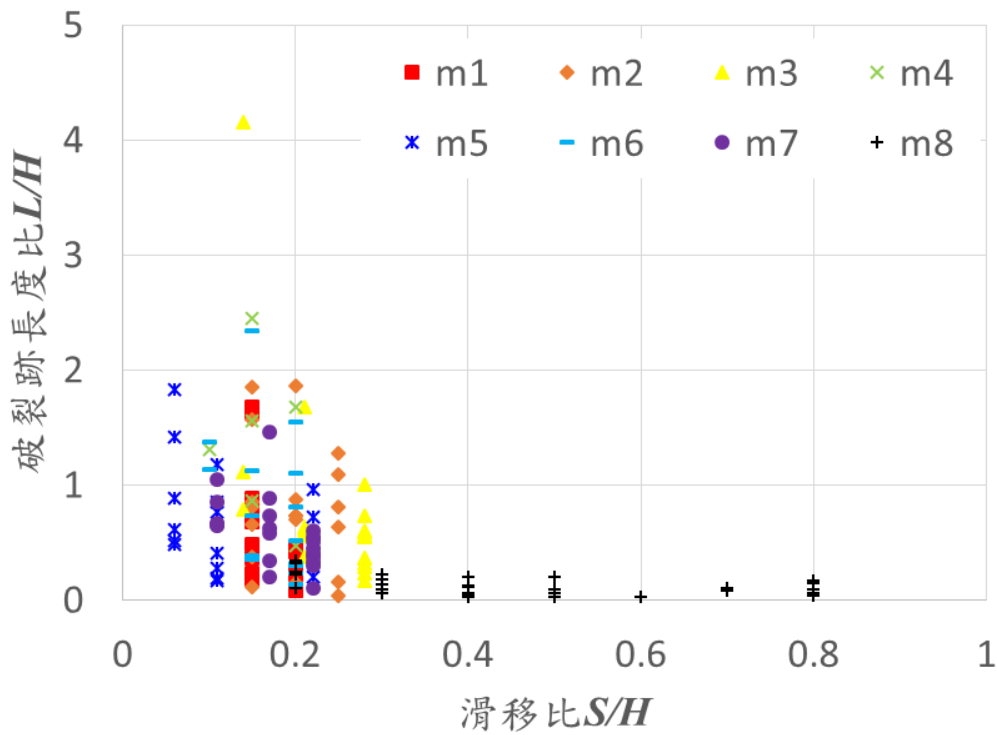


圖 5.18 地表線形長度與滑移比關係

5.4 地表影響範圍

根據 5.1 節說明，走向滑移影響範圍採用模型 1 分析結果(圖 5.4)，地表相對錯移量隨距斷層遠近呈鐘形分布，由擬合曲線的平均數得知斷層影響範圍是否有偏態，而標準差得知影響範圍寬度，當 y 方向滑移量(S_y/H)由-0.15 發展至-0.25，平均數由 0.005 m 至 0.004 m，與斷層投影線位置(0)相距不遠，未有偏態現象，標準差由 0.046 m 降至 0.028 m，顯示主要影響範圍並未明顯擴大。

傾向滑移影響範圍採用模型 4 進行分析，結果如圖 5.19 所示，當 z 方向滑移量(S_z/H)由 0.15 發展至 0.25，平均數約-0.027 m 明顯偏態，顯示影響範圍主要落於下陷側砂盒，標準差由 0.024 m 降至 0.016 m，顯示主要影響範圍束縮。

斜向滑移影響範圍採用模型 3 進行分析，結果如圖 5.20 所示，當 y 方向滑移量(S_y/H)由-0.15 發展至-0.25，平均數由-0.034 m 至-0.036 m 明顯偏態，標準差由 0.016 m 降至 0.008 m，顯示主要影響範圍束縮，當 z 方向滑移量(S_z/H)由 0.15 發展至 0.25，平均數由-0.031 m 至-0.025 m 明顯偏態，顯示影響範圍主要落於下陷側砂盒，標準差約 0.021 m。

分析結果(圖 5.21)顯示，標準差統計表示斷層影響範圍，當具有走向滑移分量(S_y)，參考最大值顯示斷層影響範圍為斷層投影線兩側各 5 公分，此結果也協助下節資料分析，當具有傾向滑移分量(S_z)，斷層影響範圍位置將會偏態，移至地形陷落側，而走向及傾向滑移分量共存時，斷層影響範圍較純走向滑移模型小，影響範圍如圖 5.22 所示，約為 0.5 倍覆土厚度。

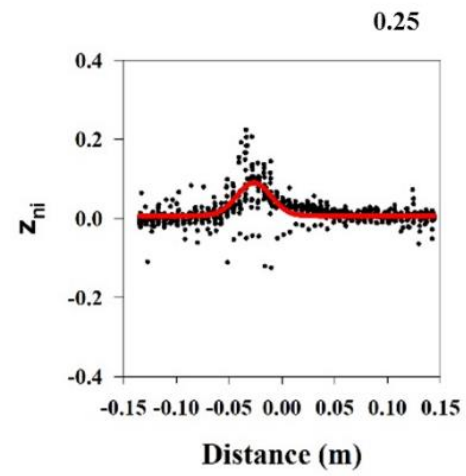
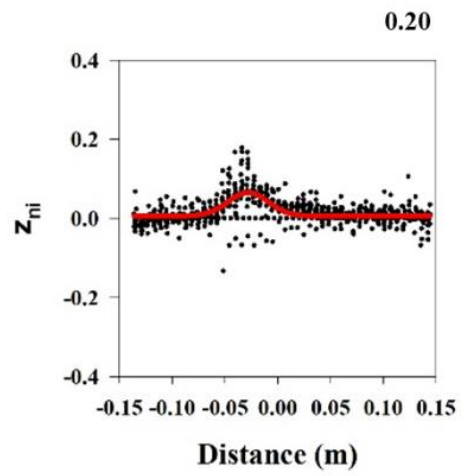
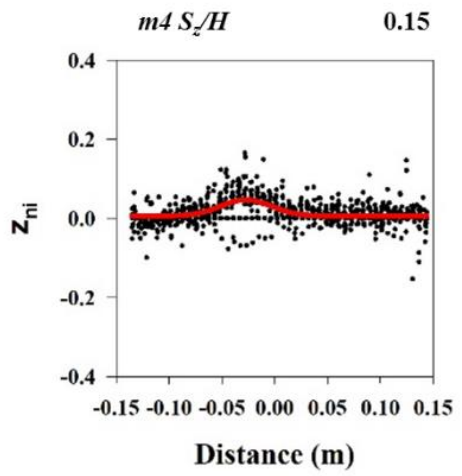


圖 5.19 模型 4 影響範圍討論

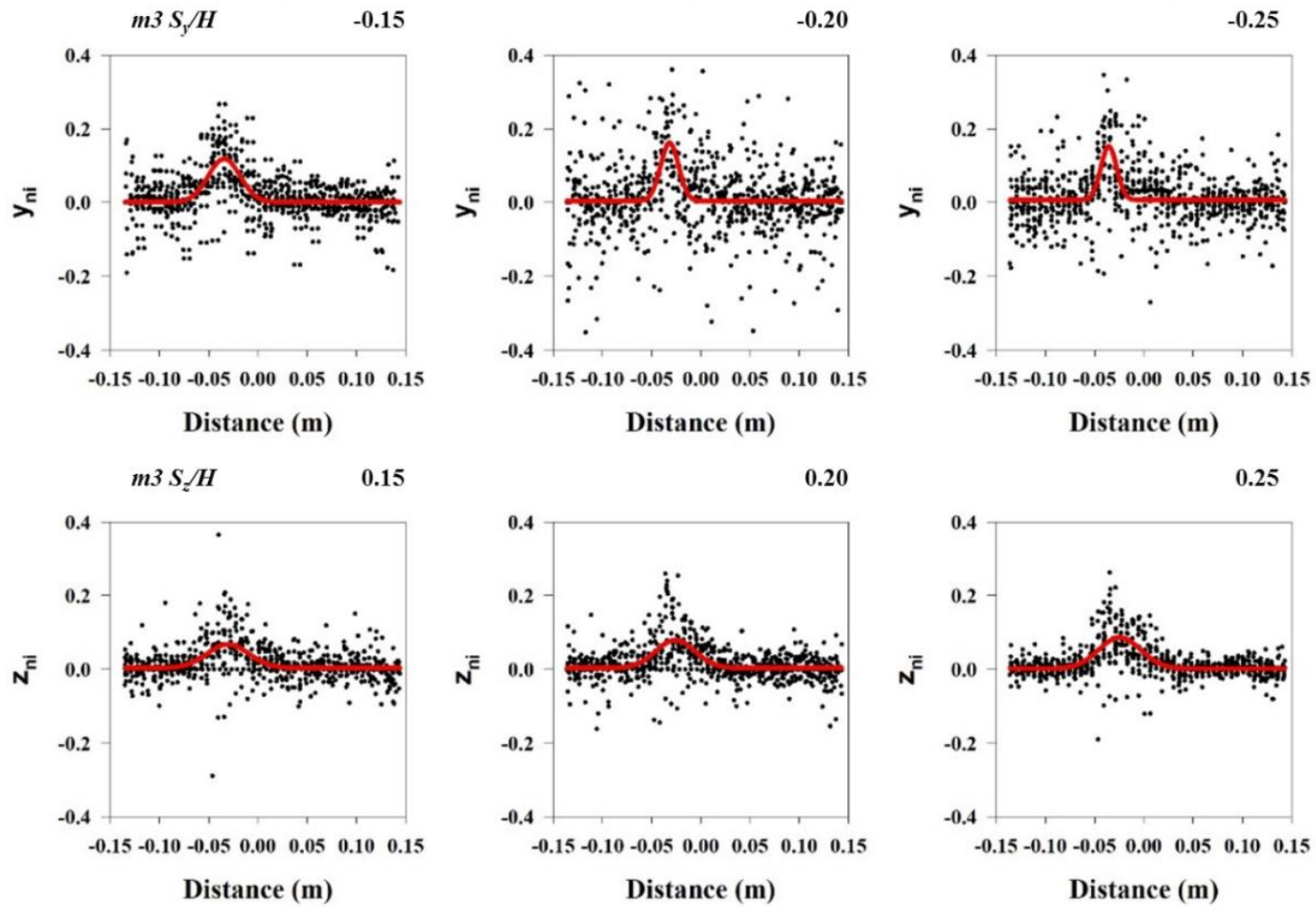


圖 5.20 模型 3 影響範圍討論

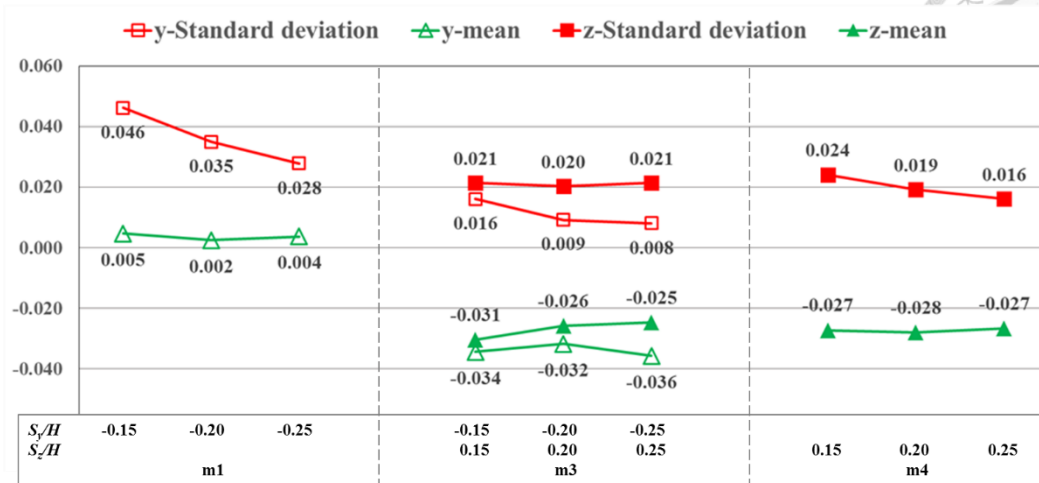
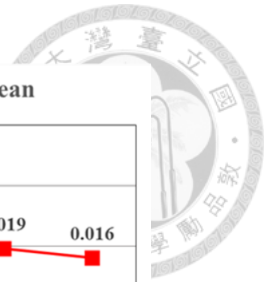


圖 5.21 統計分析結果

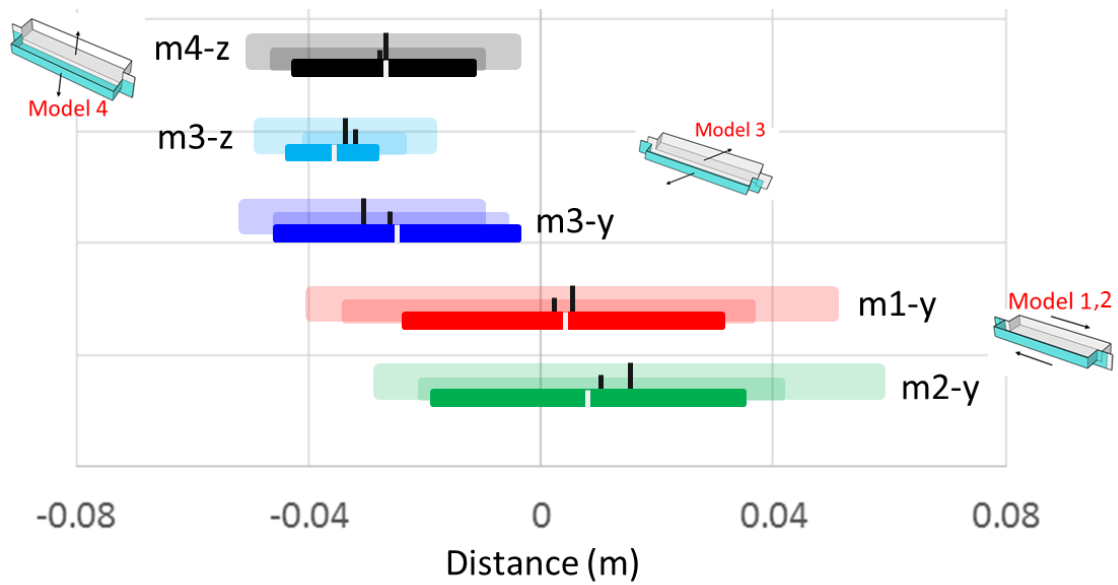


圖 5.22 影響範圍結果



5.5 坡向分析

斜移斷層錯動時地表土層受到特定方向的擠壓或拉伸，形成地形上隆起或陷落等地貌特徵，此類地貌若為單一隆起則稱之丘(Hill)，數個丘相鄰稱之山脊(Ridge)；而地貌若為單一陷落區則稱為窪地(Depression)，數個低地相連稱為谷(Valley)，透過地貌特徵說明物理試驗地表變遷與量化分析。本研究嘗試使用地表資訊探討斷層滑移類型，斷層面(fault plane)在地表之交線稱為斷層線(fault line)，走向滑移斷層多伴生數段雁型排列的斷層線，而傾向滑移斷層的斷層線較長且平直，斷層線可判斷走向或傾向滑移，但卻不易細分正逆滑移。斷層線兩側之地表高度不等，尤其以傾向斷層最為明顯，正逆滑移所產生的地表坡向顯著不同，因此本研究選用坡向討論量化及建立指標。

透過上節分析成果瞭解以本研究砂箱模型，斷層影響範圍集中於斷層投影線兩側各 5 公分，總計 10 公分寬及 100 公分長範圍內地貌，屬於斷層遠域(off-fault)範圍。本節地貌分析以坡向變化為主，顯示原平坦地面受到斷層作用擠壓伸張後坡向的變化。

探討滑移方向對地表地貌之影響，分別為走向滑移(m1、m6)：右移 2 公分、左移 2 公分；傾向滑移(m4)：抬升 2 公分；斜向滑移(m3、m5)：右移及抬升各 2 公分、左移 2 公分及抬升 1 公分。將坡向分 8 個區間為北、東北、東、東南、南、西南、西及西北，所代表的角度如圖 5.23 所示，不同斷層滑移類型之坡向分布如圖 5.24 所示，統計分析採用範圍內各坡向面積，除以總面積得為面積比。分段敘述走向滑移、傾向滑移及斜向滑移模型之地形坡向面積比，以討論滑移類型對地表地形坡向之影響。

走向滑移模型(m1)統計地形坡向面積比，結果採用玫瑰圖表示各坡向方位特徵如圖 5.25 所示，斷層未滑移時初始地表(m1r0)資料顯示 8 個坡向面積比範圍落在 10 – 17%之間，並無顯著特徵坡向，亦表示初始模型地表平緩。斷層模型每滑

移 0.5 公分進行地表地形紀錄，分別由 r1 代表滑移量達 0.5 公分，而累加至 r4 代表總滑移量達 2 公分，各階段 8 個坡向面積比範圍落在 11 – 16% 之間，並無顯著特徵坡向。走向滑移模型(m6)，結果與模型 m1 相似，累加滑移階段至 r4，8 個坡向面積比範圍落在 12 – 14% 之間，並無顯著特徵坡向。

傾向滑移模型(m4)統計地形坡向面積比，結果如圖 5.25，顯示斷層未滑移時初始地表(m4r0)資料顯示 8 個坡向面積比範圍落在 11 – 17% 之間，並無顯著特徵坡向，亦表示初始模型地表平緩。斷層滑移至 r1 階段，滑移量達 0.5 公分，面積比範圍落在 8 – 16% 之間，顯著坡向為西、南西；滑移量達 1 公分，面積比範圍落在 3 – 34% 之間，顯著坡向為西；滑移量達 1.5 公分，面積比範圍落在 2 – 43% 之間，顯著坡向為西；而總滑移量達 2 公分，面積比範圍落在 1 – 54% 之間，顯著坡向為西。

斜向滑移模型(m3)統計地形坡向面積比，結果如圖 5.25，顯示斷層未滑移時初始地表(m3r0)資料顯示 8 個坡向面積比範圍落在 8 – 21% 之間，南北向較顯著，推測為指準層鋪砂影響。斷層模型各方向滑移 0.5 公分進行地表地形紀錄，走向及傾向滑移量皆達 0.5 公分，面積比範圍落在 8 – 17% 之間，顯著坡向為西；滑移量皆達 1 公分時，面積比範圍落在 4 – 28% 之間，顯著坡向為西；滑移量皆達 1.5 公分時，面積比範圍落在 4 – 32% 之間，顯著坡向為西；而滑移量皆達 2 公分時，面積比範圍落在 2 – 41% 之間，顯著坡向為西，透過模型(圖 5.24)觀察地表具有北北東 – 南南西走向的線形，線形延續性介在走向滑移與傾向滑移之間。

將走向滑移(m1、m6)、傾向滑移(m4)及斜向滑移(m3、m5)綜合比較最後滑移階段之地表坡向，如圖 5.26 所示，傾向滑移分量顯著影響坡向方位，如模型 m4，地形上呈現平行斷層的崖坡面，而坡向面對陷落側，意指正斷層則地形坡向面對上盤，逆斷層則地形坡向面對下盤，坡向面積比可達 50% 以上；當傾向錯移量與走向錯移量並存時，如模型 m3、m5，坡向方位主要受傾向滑移影響，坡向面積比達 40%



以上，亦可指示斷層線形。

將最後滑移階段(r4)與初始滑移階段(r0)的地表坡向面積比相減，計算出地表坡向面積比變化量，為累積面積比(Cumulative area ratio)，如圖 5.27 所示。初始滑移階段之地表坡向約平均分布，而傾向滑移後優勢坡向面積比提高，如圖 5.28 所示，走向滑移模型(m1、m6)之滑移前後，坡向面積比變化量在-3% - 3%之間；具有傾向滑移的模型(m3、m4、m5)，滑移前後坡向面積比變化量中，優勢坡向的面積比增加量高達 28% - 43%，表示傾向滑移顯著改變坡向。本研究嘗試利用優勢坡向面積比，推估斷層滑移角，使用模型 m1、m3、m4 及 m6 等試驗結果，回歸斷層滑移角與地表優勢坡向面積比之關係，得到 2 次多項式分布，如圖 5.29，回推模型 m5 之斷層滑移角為 36 度，屬左移兼逆衝分量，與實際值 30 度相似，推估效果良好，但目前僅使用四組滑移角分析，不易討論其準確度，對於不同滑移角及其他邊界條件，亦會影響地表坡向特徵，建議後續可以持續討論。

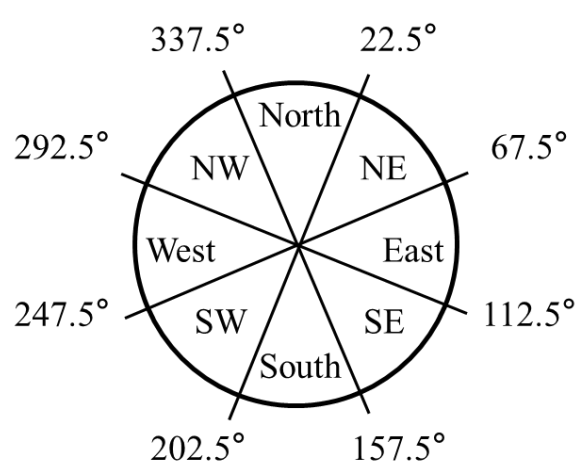
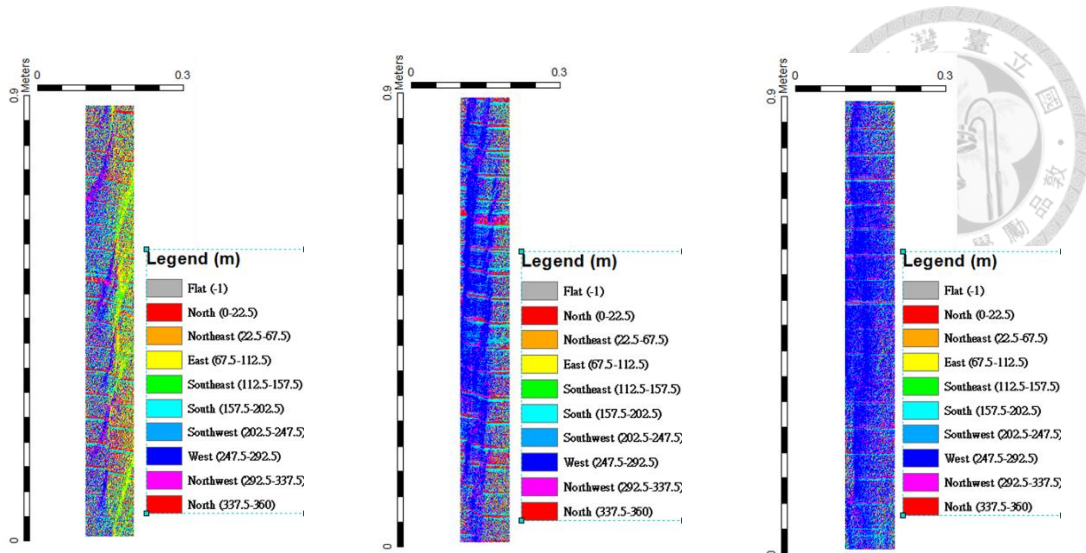


圖 5.23 坡向區間表示



走向滑移(m1)

斜向滑移(m3)

傾向滑移(m4)

圖 5.24 滑移坡向分布

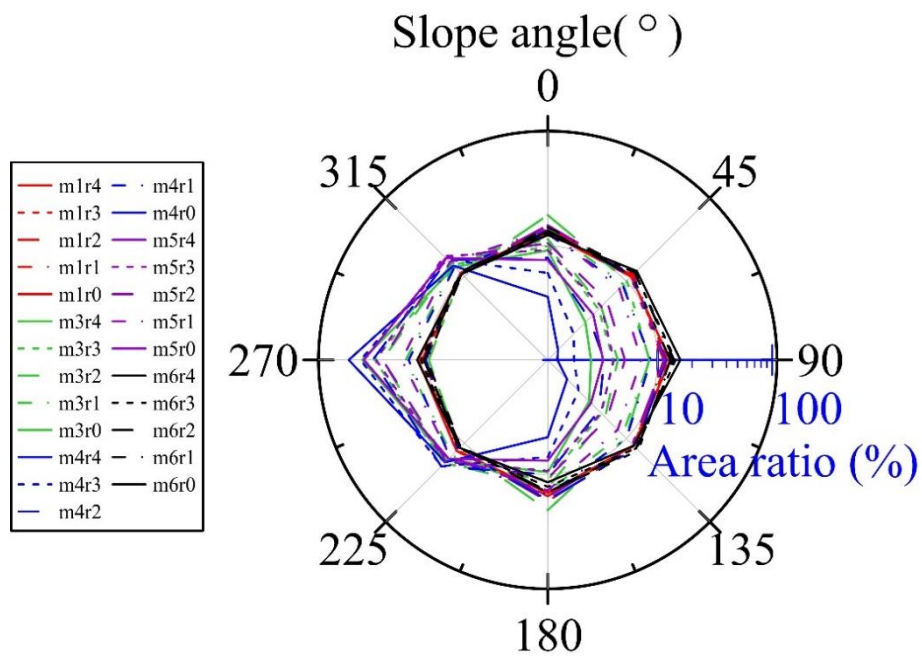


圖 5.25 滑移坡向面積比

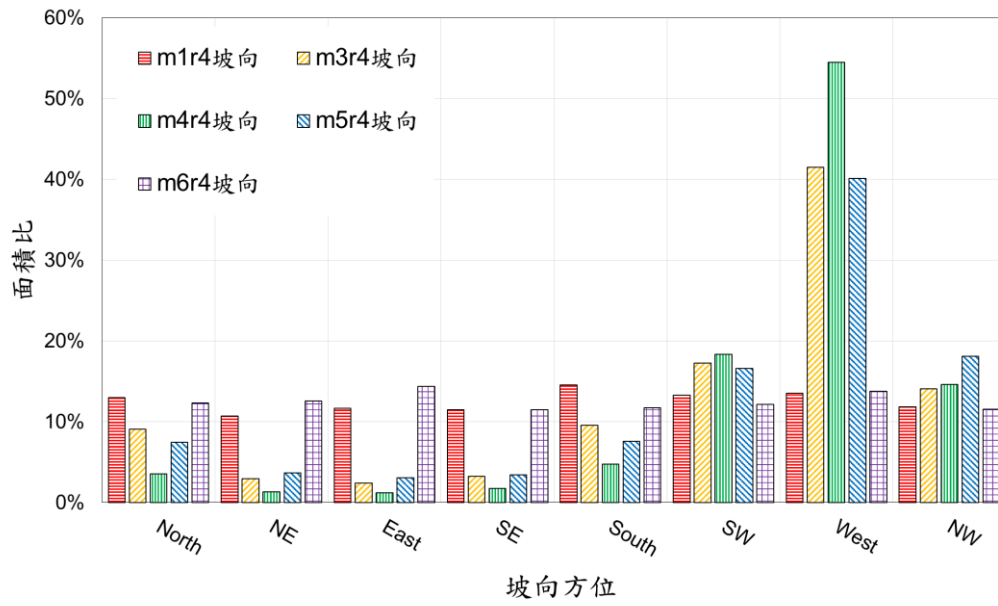
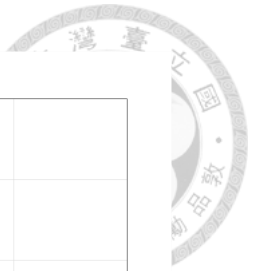


圖 5.26 綜合地形坡向面積比

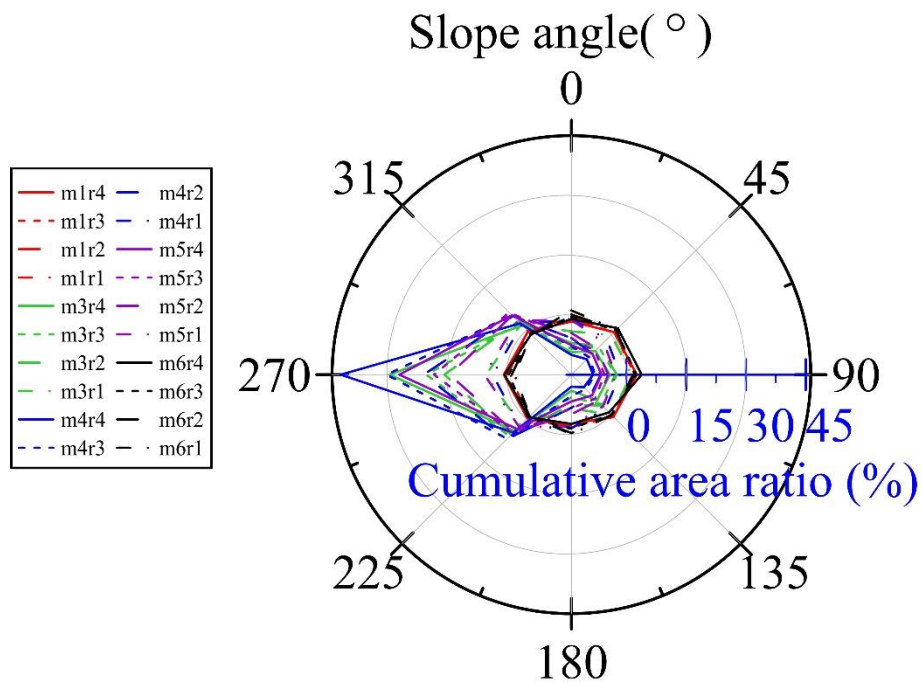


圖 5.27 綜合地形坡向累積面積比玫瑰圖

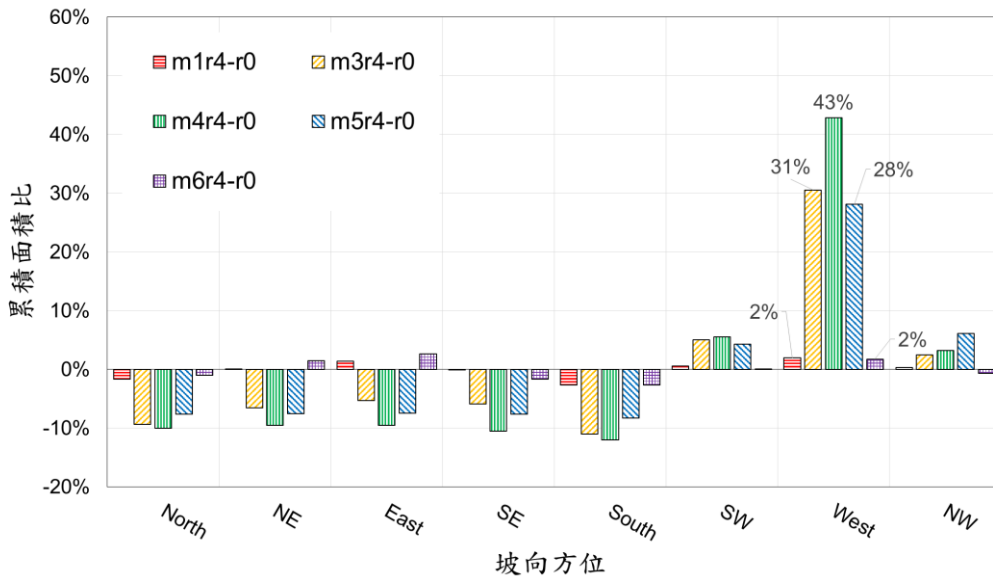
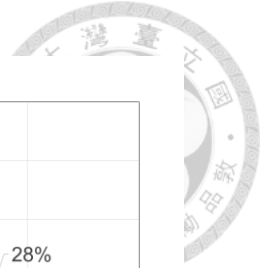


圖 5.28 綜合地形坡向累積面積比

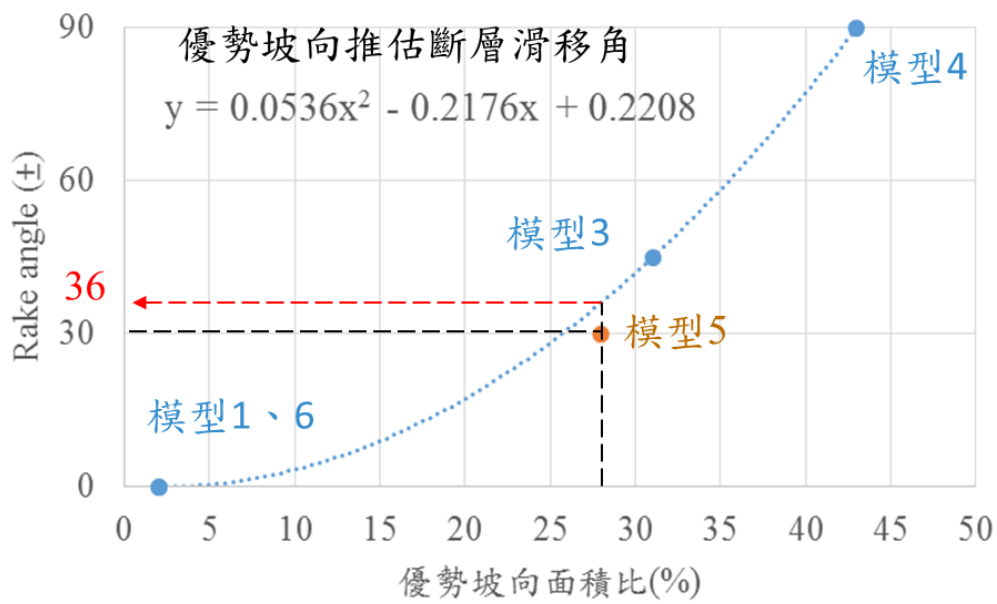


圖 5.29 優勢坡向推估斷層滑移角



5.6 土中斷層面分布及隨深度的變化

接續前節採用三種斷層類型探討土中斷層面分布及隨深度的變化，分別為走向滑移(m1)：右移 2 公分；傾向滑移(m4)：抬升 2 公分；斜向滑移(m3)：右移及抬升各 2 公分。根據地表破裂跡選定剖面位置，分段敘述走向滑移、傾向滑移及斜向滑移模型剖面特徵，利用土中指準層協助判讀斷層面擴展位置(圖 5.30)。

圖 5.31 由左至右分別為模型 1 破裂跡位置及正射影像、剖面影像、土中斷層面描繪圖，因地表破裂跡夾角主要為三種，因此選定不同夾角之破裂跡，進行四個剖面觀察，剖面位置分別為 y 等於 0.22、0.25、0.30 及 0.35，基盤斷層投影線由綠色點折線表示。結果顯示土中斷層面隨深度影響，斷層尖端開始向上時，其斷層面角度較緩；當斷層尖端擴展接近地表時，其角度變陡，呈現花狀構造，而土中斷層面由基盤擴展至地表，當斷層面越接近基盤斷層投影線(綠色折線)，則土中斷層面角度越陡，當遠離基盤斷層投影線時，角度較緩。

觀察不同斷層滑移角試驗，具有走向滑移模型，在不同剖面位置其土中斷層面數量不一(圖 5.32)，而當具有傾向滑移之模型，斷層尖端開始向上時，其斷層面角度較陡；當斷層尖端擴展接近地表時，其角度變緩(圖 5.33)，顯示地形上高程差會擠壓斷層面至地勢較低區域，且約由覆土厚 1/3 之處起斷層面角度顯著改變。

為了求取土中最大影響範圍，疊合不同模型各剖面土中斷層面線型，繪製最大影響範圍並數化，再將不同模型土中斷層面線型繪製於同一圖內(圖 5.34)，線性回歸計算斷層兩側土中影響範圍，試驗分析包括抬升模型，因此兩側影響範圍並不對稱，抬升側影響寬度約土厚的 0.17 倍，陷落側影響寬度約土厚的 0.41 倍，採用線性回歸，因此於地表會有低估現象。

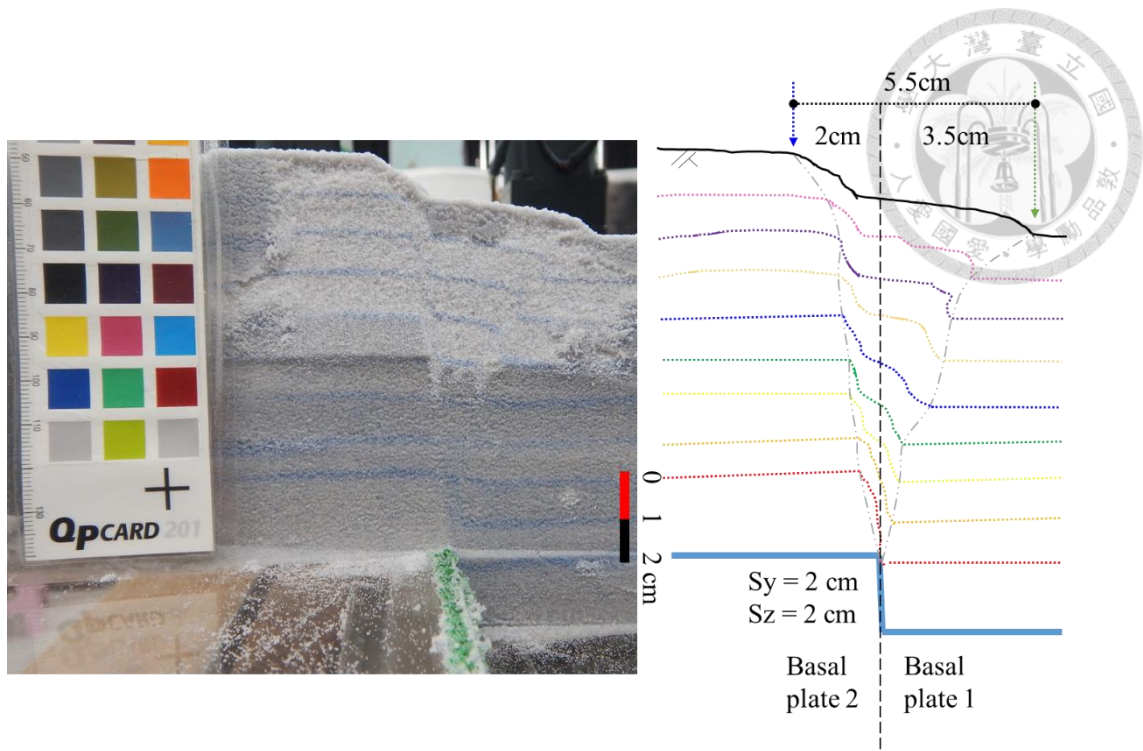


圖 5.30 砂箱模型剖面及描繪方式

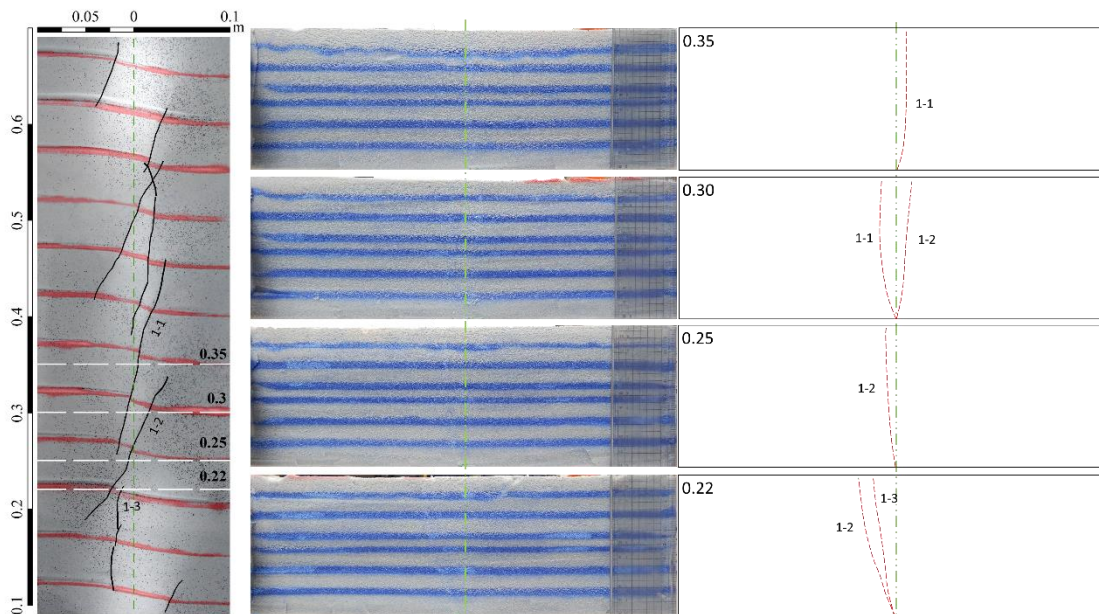


圖 5.31 走向滑移砂箱模型(m1)剖面及描繪圖

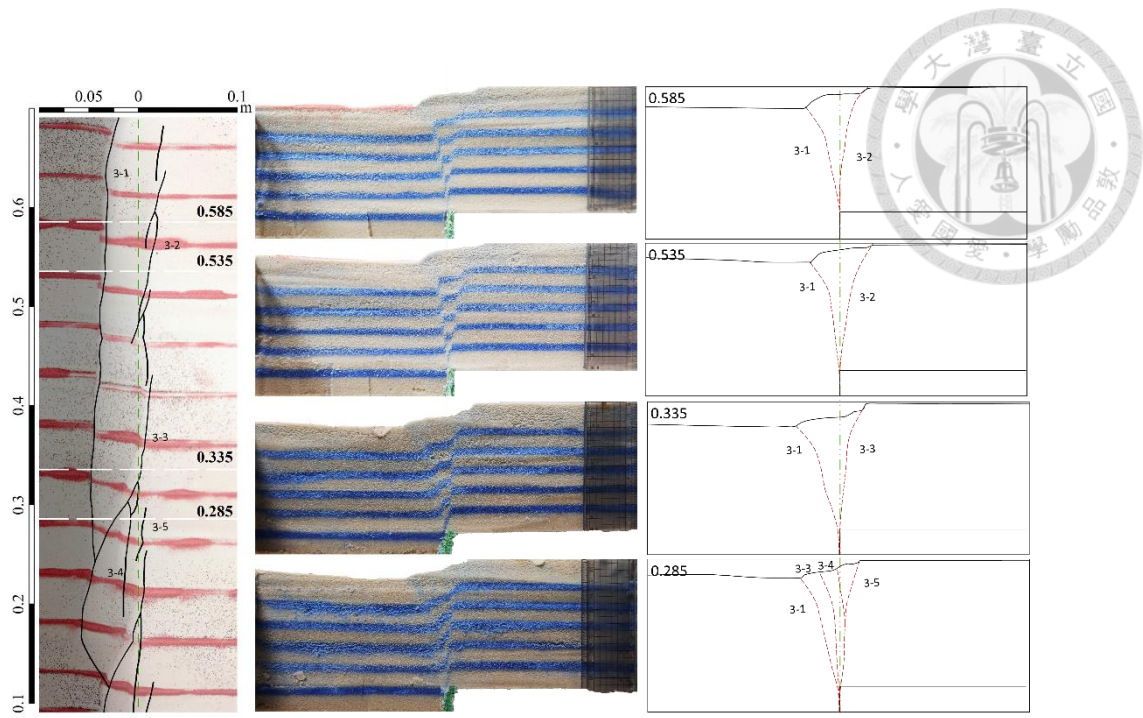


圖 5.32 斜移砂箱模型(m3)剖面及描繪圖

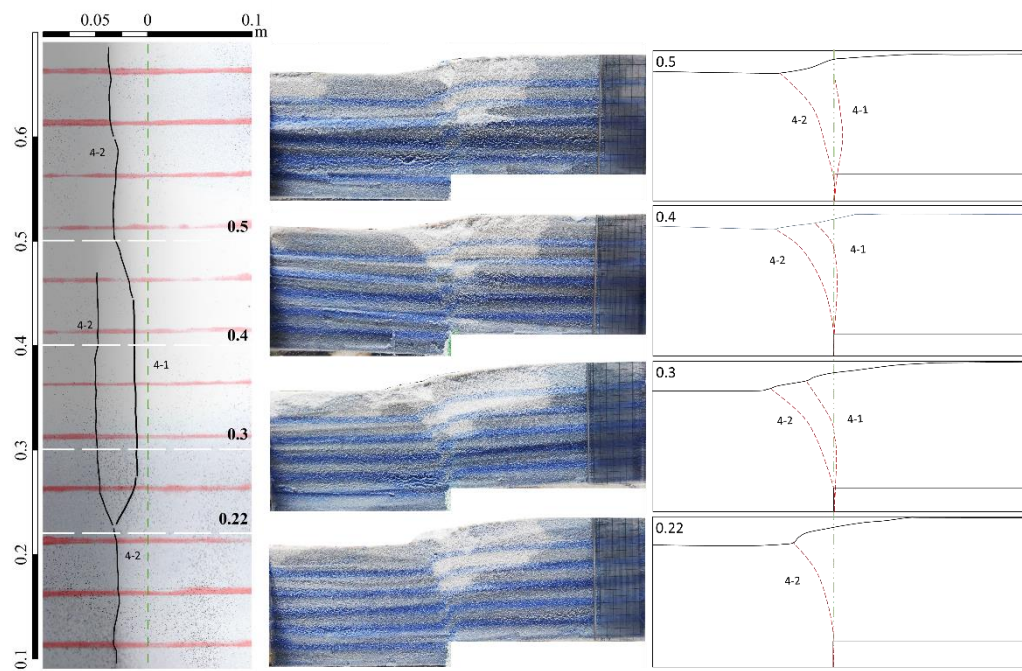


圖 5.33 傾向滑移砂箱模型(m4)剖面及描繪圖

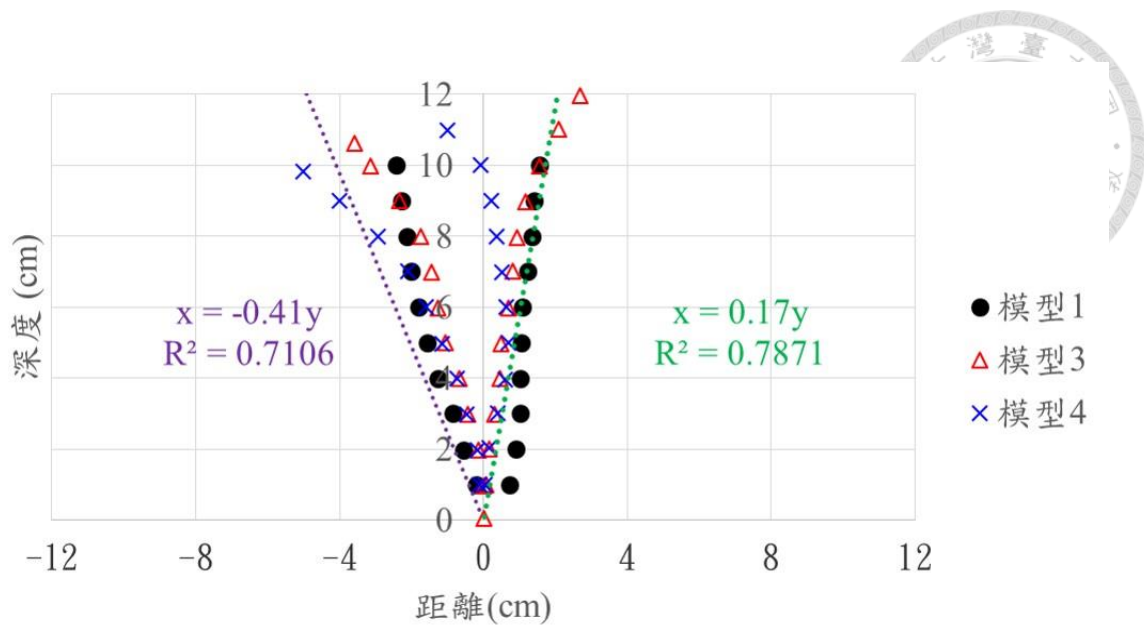


圖 5.34 剖面分析



5.7 覆土厚之影響

彙整本研究及前人砂箱數據(Naylor et al. (1986); 上田圭一 & 谷和夫 (1999); Le Guerroué & Cobbold (2006); Soto et al. (2007); Toscani et al. (2009))，上述前人研究試驗屬平移斷層模型，覆土厚度包括 1 公分至 200 公分等資料，比較滑移量及影響寬度，如圖 5.35 所示，顯示地表影響帶寬與滑移比關係具有一峰值，最大影響範圍為 2.7 倍覆土厚度，而平均值為 0.8 倍覆土厚度，當滑移量越增加時，影響帶寬範圍越小。

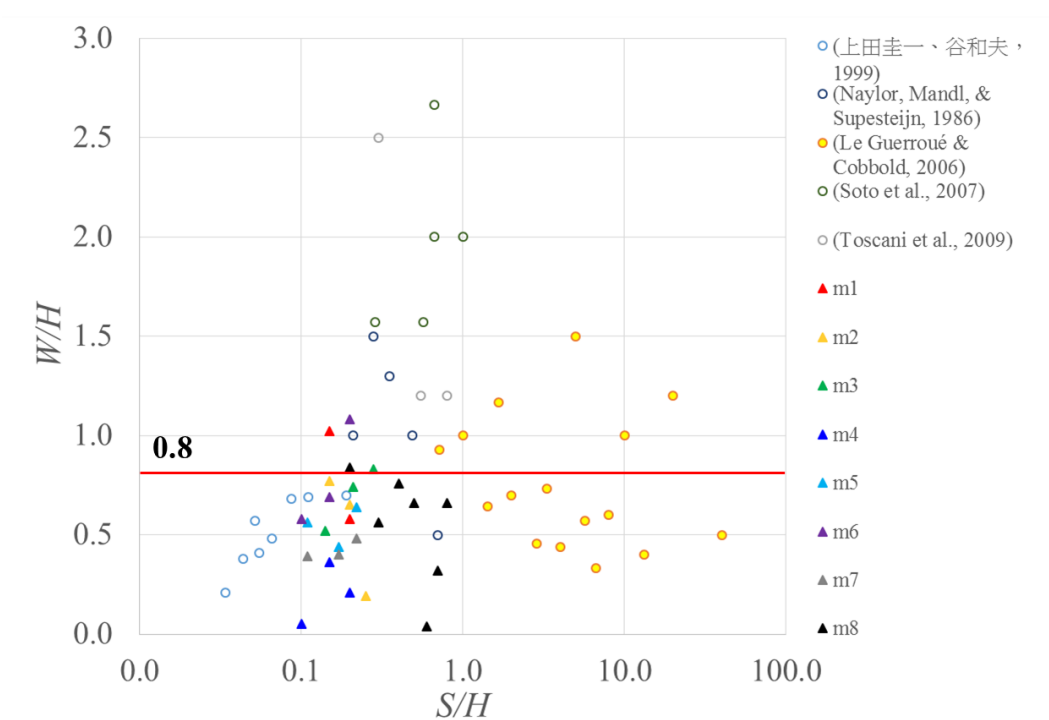


圖 5.35 地表影響帶寬與滑移比關係

第6章 現地案例與砂箱試驗對比



6.1 剖面比對

2016 熊本地震於益城町役場至堂園地區為布田川斷層出露，蒐集鄰近槽溝及露頭資料，南至北為田中槽溝(32.785397, 130.836323)、上陣(上陳)露頭(32.802182, 130.855497) 及堂園槽溝(32.804665, 130.859118)，現地照片如圖 6.1 所示，位置如圖 6.2 所示。

三處觀察點皆為上覆土層出露，田中槽溝為 2016 熊本地震事件前開挖，顯示前期事件土中斷層面(紅色實線)已延伸至近地表，而上陣(上陳)露頭及堂園槽溝為 2016 熊本地震事件後調查，斷層面皆破裂至地表，呈現高角度，上陣(上陳)露頭之 F1 斷層傾角為 90 度垂直，走向為北 60 度東，且地表以水平位移為主，最大位移量為 2 公尺。配合前述 5.6 節結果顯示，若為走向滑移斷層，土中斷層尖端擴展接近地表時，其角度變陡呈現花狀構造，與益城町三處觀察點相符，因此推論此區斷層主要為走向滑移，後續對比將選用走向滑移模型進行擬合。

6.2 地表破裂跡及下一期事件可能之地表破裂區域

布田川斷層走向約為北 55 度東，範圍內地表主要產生五道顯著破裂跡，如圖 6.3 所示，破裂跡分別為 S1~5，其走向角度如表 6.1，根據上節選定走向滑移模型比對，可觀察出模型 1 滑移量為 $-0.15(S_y/H)$ 時(m1r3)，旋轉斷層走向與砂箱基盤斷層一致，比對地表破裂跡等地貌表徵，可順利對比三道破裂跡為 1-1、1-4 及 1-5(表 6.1)。

以模型 1 滑移量為 -0.15 假設現況，推測下期事件可能之地表破裂區域，採用模型 1 滑移量為 -0.20 階段(m1r4)表示，結果顯示，地表破裂跡 1-1 將向東北沿伸，而破裂跡 1-4 轉向至北方接續其他破裂跡末端，破裂跡 1-5 維持既有長度，以上可做為未來減震規劃方向，後續利用此模型推估益城町地區上覆土層厚度，及進行地表位移場分析。



6.3 上覆土層厚度推估

根據前節，瞭解益城町區域斷層模型為平移斷層，且利用地表破裂跡，推估該區地質模型相似於模型 1，並對比出三道現地破裂跡與砂箱破裂跡，期望藉由對比之破裂跡錯移特徵，推估上覆土層厚度。

參考 Shirahama et al. (2016) 於 2016 熊本地震事件後，利用現地地貌及地物調查，統計沿斷層線分布之相對滑移量，如圖 6.4 所示，數化對比範圍內益城町區域資料，區分主斷層及分支斷層，彙整成表 6.2，選用模型 1 地表破裂跡相關位置的指準層，對比主斷層及分支斷層，分別計算錯位量(y_{ni})，如圖 6.5 所示，而模型 1 試驗之上覆土厚為 10 公分，將錯位量正規化後填入表 6.2 中，由現地錯位量及砂箱成果之錯位比(y_{ni}/H)，推估現地土層厚度，結果為 6.8 至 8.8 公尺。

參考地震調查研究推進本部 (2013) 對分支斷層的調查，文獻中於益城町有一剖面(B-B')，位置及剖面如圖 6.2 所示，該剖面為益城町至益城町役場，兩處鑽探得知上覆土層約 10 公尺，基盤為阿蘇 4 火山碎屑物(Aso-4)，該層約為 10 萬年前自阿蘇火山噴發，厚度可達 40 公尺以上，而鑽探未鑽穿阿蘇 4。剖面位置鄰近推估土層厚度位置，參考文獻上覆土層厚度為 10 公尺，而推估土層厚度為 6.8 至 8.8 公尺，其成果相當接近，顯示地表錯位量亦可推估上覆土層厚度。

6.4 位移場分析

參考蔡維哲 (2005) 使用質點影像測速儀分析(PIV-Particle Image Velocimetry) 應用航空影像分析位移場研究，該技術原使用於流體工程，其可用於觀測流場，得到整個流場在一微小時間距下的瞬時速度場，本研究使用 PIV 分析下陣及堂園地區，受到熊本地震引致地表變形之位移場分布，使用影像為アジカ航測株式會社 (<http://www.ajiko.co.jp>) 所公開的紅色立體投影圖(Red Relief Image Map, RRIM)(圖 6.6)，紅色圖建立是使用光達數值高程模型，透過坡度及天空開闊度計算，套疊影像圖層後協助閱讀地形起伏的影像視覺化技術(Chiba et al. (2008))，成果能展現地

形上地陡峭與凹凸特性，其中坡度視覺化影像以紅色呈現，影像上色階越紅表示地形越陡；天空開闊度則以灰階呈現，色階越白表示越凸，越黑表示越凹，這些優點有利於細部地形特徵判釋(鄧嘉欣 et al. (2015))，本研究優先將紅色圖使用於 PIV 分析。

分析地區為現地踏勘點 A 下陣及調查點 B 堂園，分析使用的程式為 PIVlab，為 Thielicke & Stamhuis (2014)研發及公開，掛載於 Matlab 的附屬工具。首先決定 PIV 分析所需參數，接著進行主震前(4/15)及主震後(4/23)兩期影像的位移場分析，人工判釋出位移場中的誤差值，並選用是當的方法予以消除，以得到連續性良好的位移場。

PIV 分析進行前需決定兩個基本參數(蔡維哲 (2005))，分別為搜索視窗大小(window size)及搜索視窗的移動量(step size)，兩者設定說明如表 6.3，本研究選用搜索視窗大小為 20 pixels，每 1 pixels 約 0.5 公尺，搜索視窗的移動量為 160 pixels(圖 6.7)，調查點 A 分析結果如圖 6.8 所示，位移圖(上圖)顯示本區西南側向東北方向位移，東南側位移並不顯著，位移場(下圖)亦可觀察位移差異的分布，四周因分析邊界故有奇異值，就分析範圍內部可得本區斷層地表破裂約為北 55 度東。調查點 B 分析結果如圖 6.9 所示，位移圖(上圖)顯示本區西南側向東北方向位移，東南側位移並不顯著，位移場(下圖)亦可觀察位移差異的分布，可得本區斷層地表破裂約為北 50 度東。

對比前述所擬合之砂箱試驗(圖 6.10)，將兩兩階段進行質點影像分析，圖 6.11 為擬合本次事件之分析，結合位移場觀察，顯示破裂跡 1-4 及 1-5 之間有一高區，此外在往破裂跡 1-1 方向，另有一位移場高區，可能於地表有較大位移，亦可做為未來現地調查查核區域。圖 6.12 為推估下次事件之分析，搭配簡化模型，若下次事件為相同錯移量，則地表破裂將延續舊有破裂跡，並於破裂尖端沿伸，而位移場顯示高區範圍將擴大。



表 6.1 地表破裂跡比較表

現地破裂跡 編號	角度	砂箱破裂跡 編號
S1	N65E	1-5
S2	N45E	1-4
S3	N70E	1-1
S4	N50E	-
S5	N60W	-

表 6.2 地表破裂跡錯移量推估上覆土層厚度

現地	錯位量 (cm)	砂箱	錯位量 y_{ni} (cm)	y_{ni}/H	推估現地 土層厚度(m)
主斷層 S2、S3、S4	50	主斷層 1-5	0.74	0.074	6.8
分支斷層 S1	75	分支斷層 1-1、1-4	0.85	0.085	8.8
平均	60	平均	0.8	0.08	7.5

表 6.3 PIV 參數說明

	選項	優點	缺點
搜索視窗大小 (window size)	大	誤差會越小，即分析結果的精度會越高	涵蓋面積較大，無法突顯出細部的特徵
	小	顯示出位移場中的細節	容易有誤差值，精度下降
搜索視窗的移動量 (step size)	大	位移向量密度低	分析時間短
	小	位移向量密度增加	分析時間長

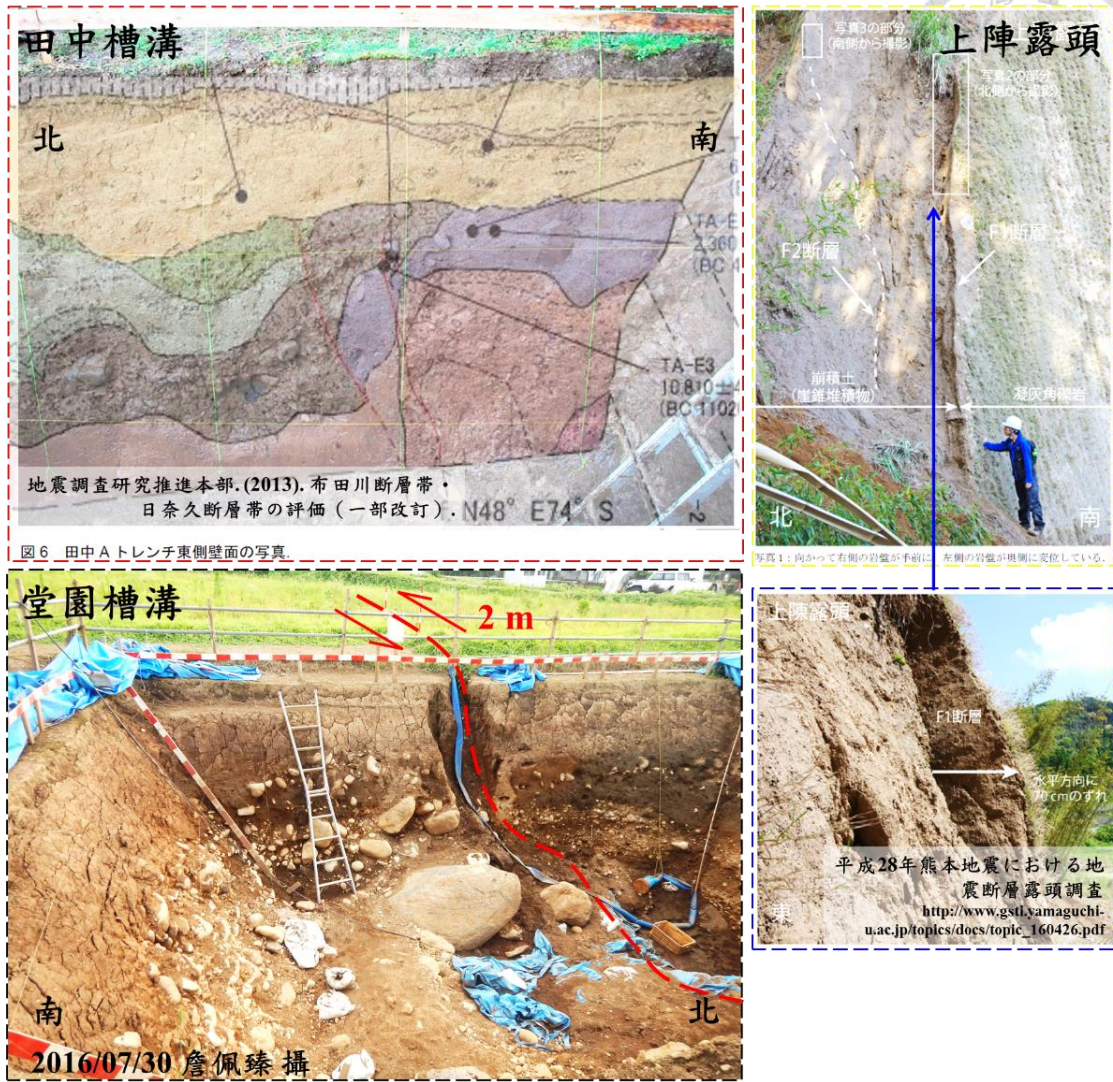


圖 6.1 布田川斷層槽溝及露頭點

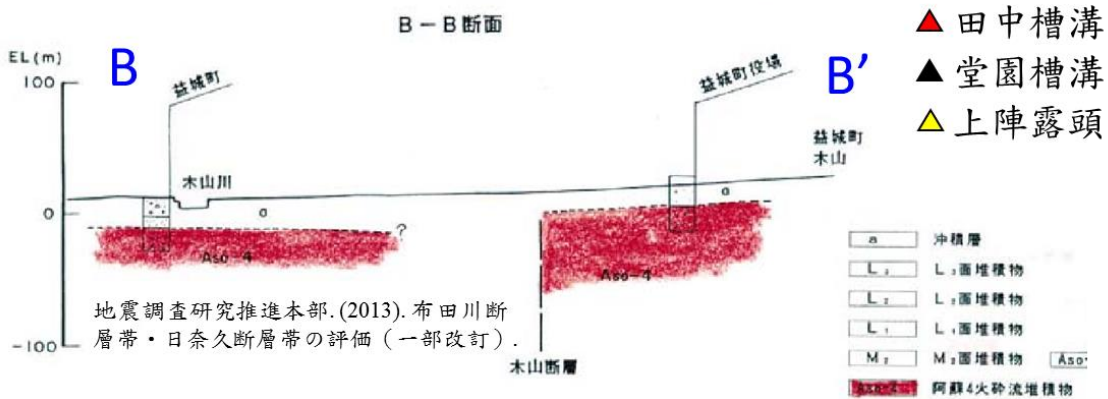


圖 6.2 益城町鄰近地質圖及觀察點位置

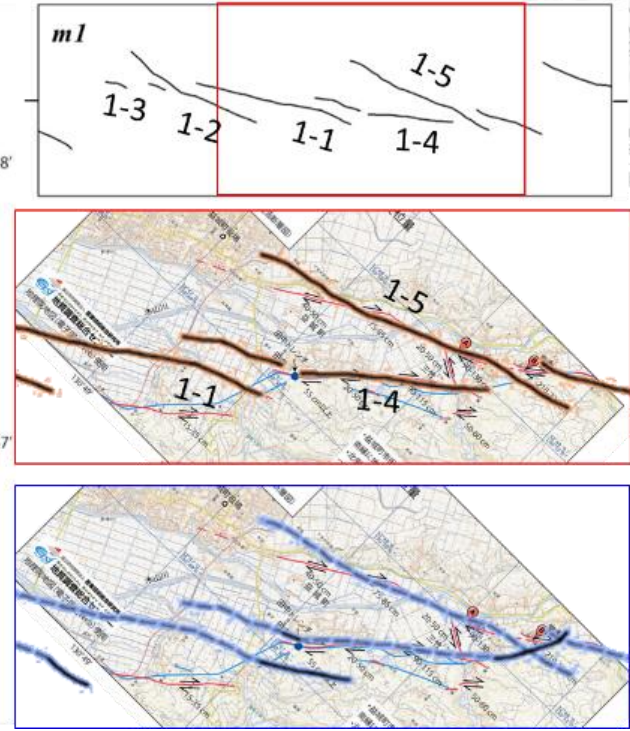
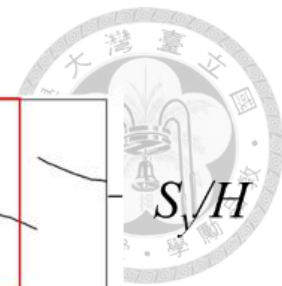


圖 6.3 現地地表破裂跡與砂箱模型比較

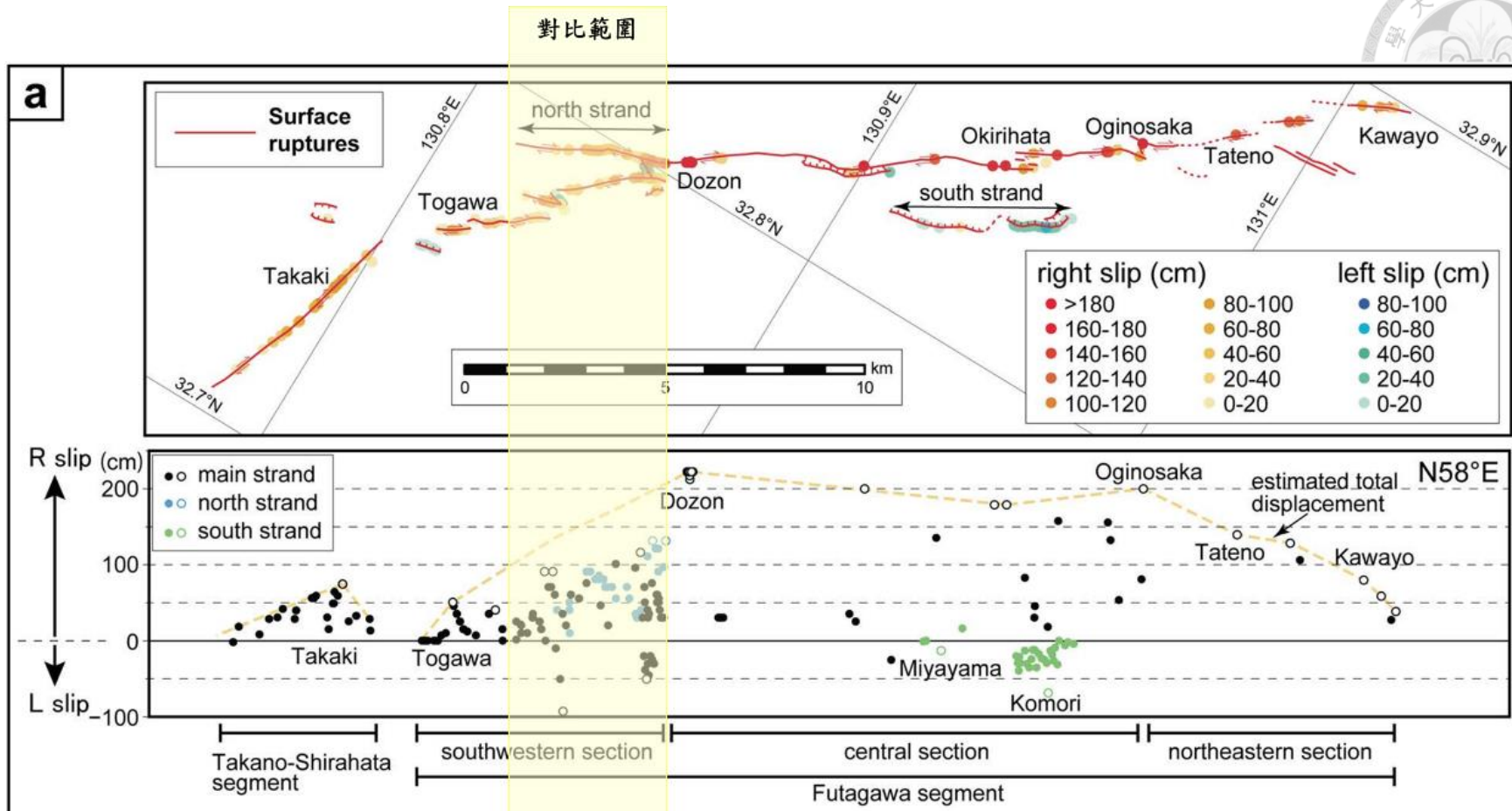


圖 6.4 對比現地地表破裂跡相對錯位範圍

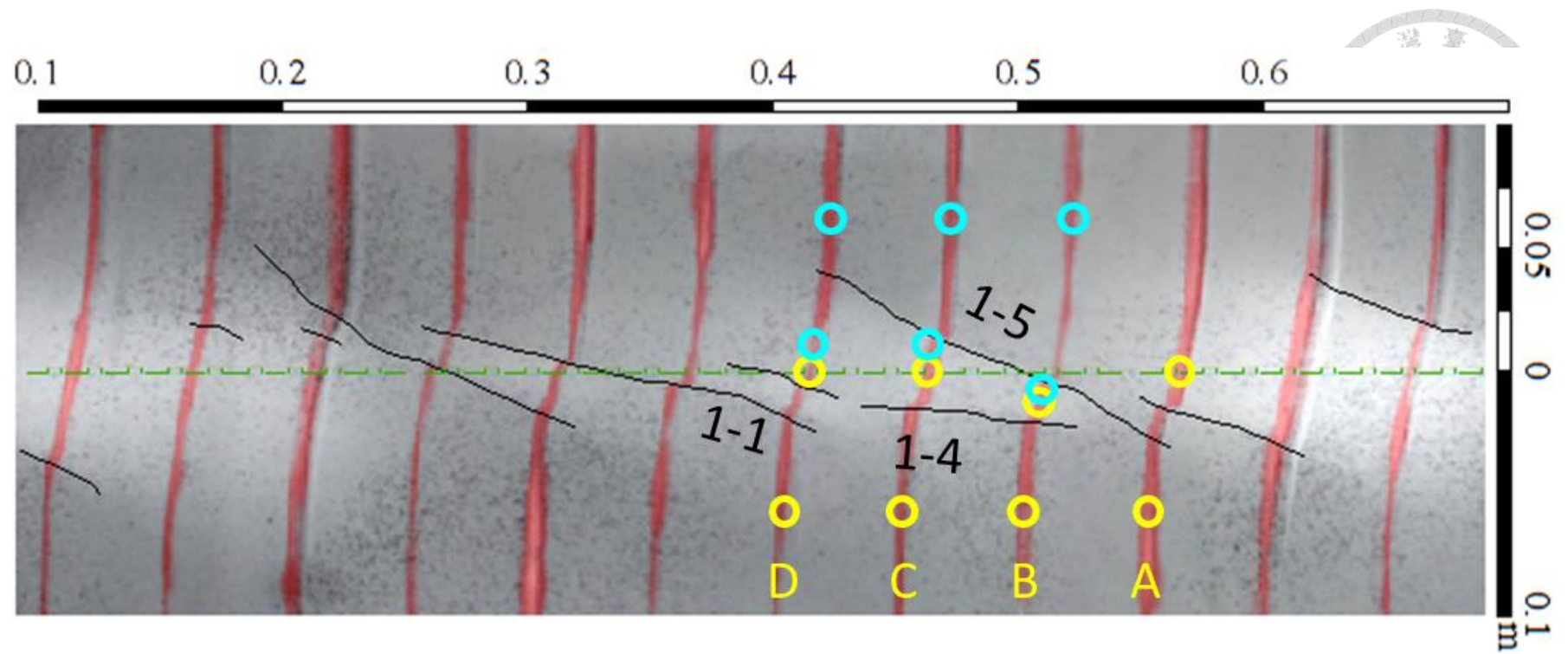


圖 6.5 模型 1 地表破裂跡錯位量(y_{ni})計算位置

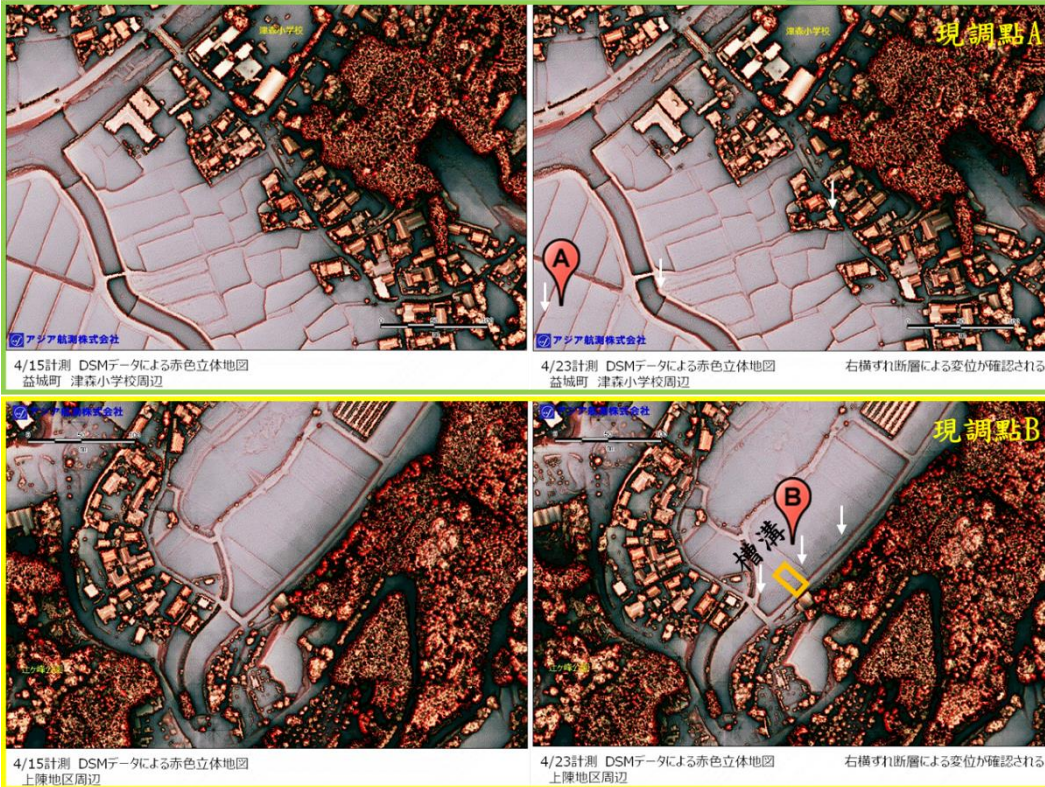
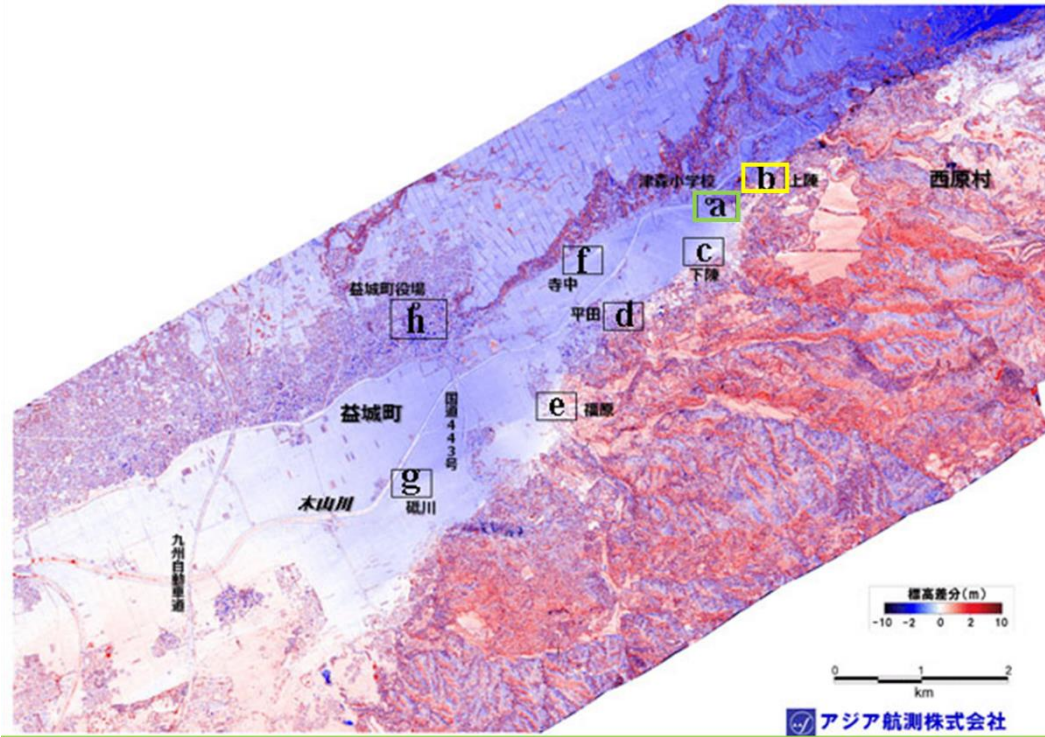
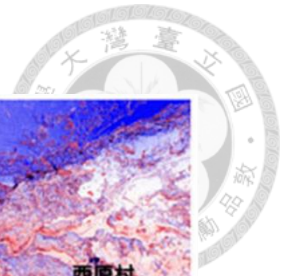


圖 6.6 調查區赤色立體地圖

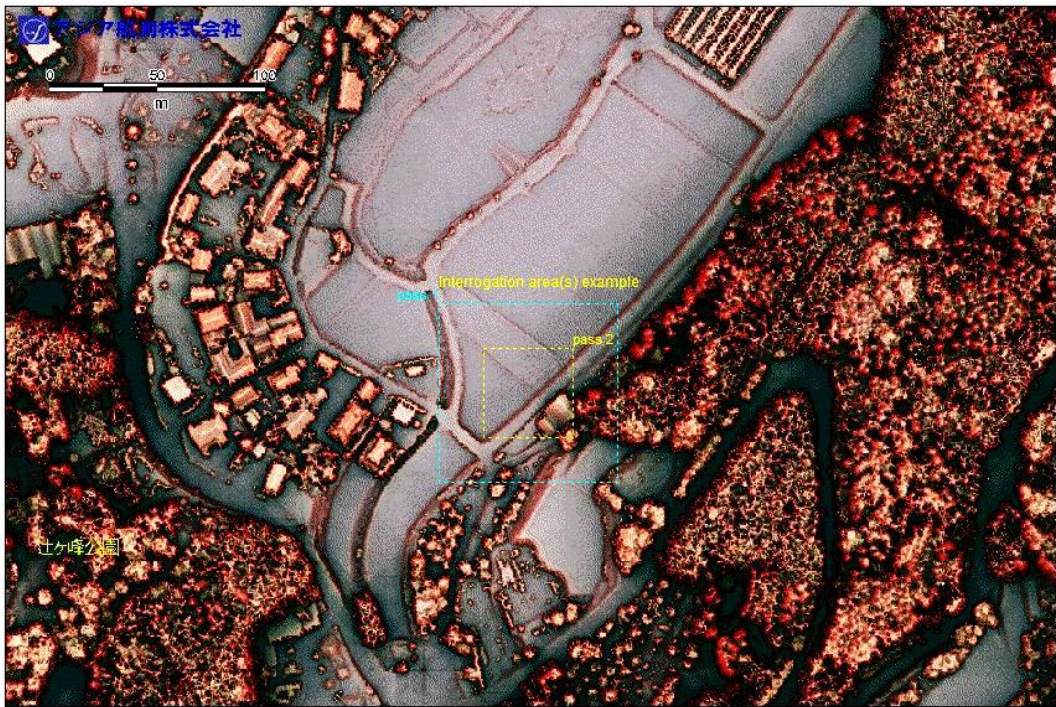
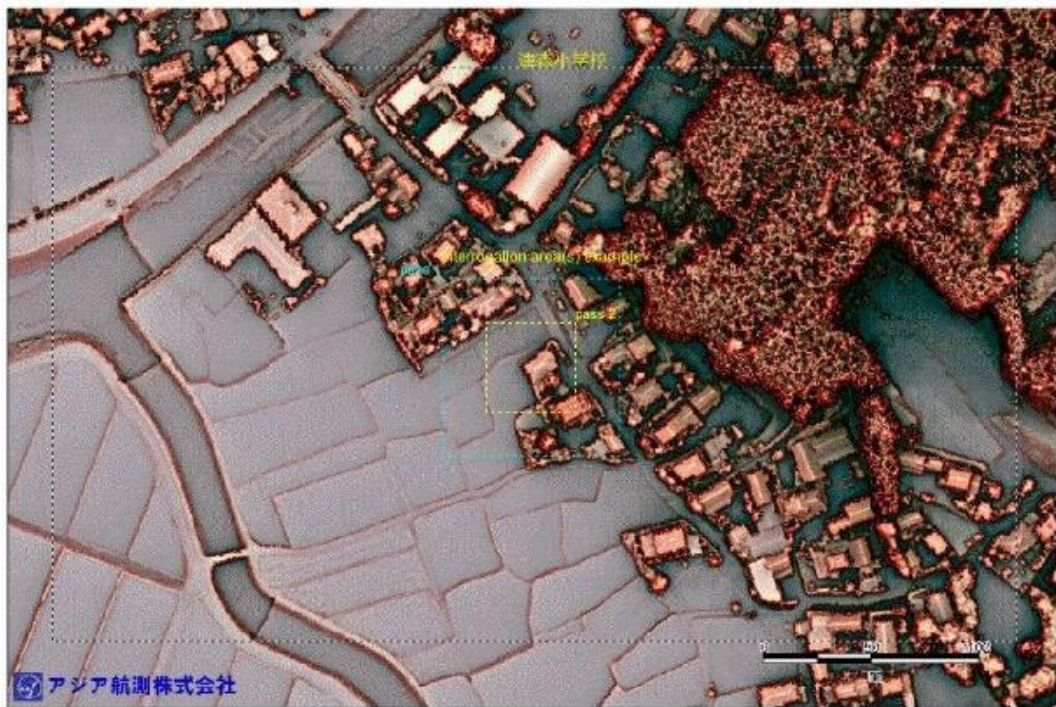


圖 6.7 PIV 分析參數示意

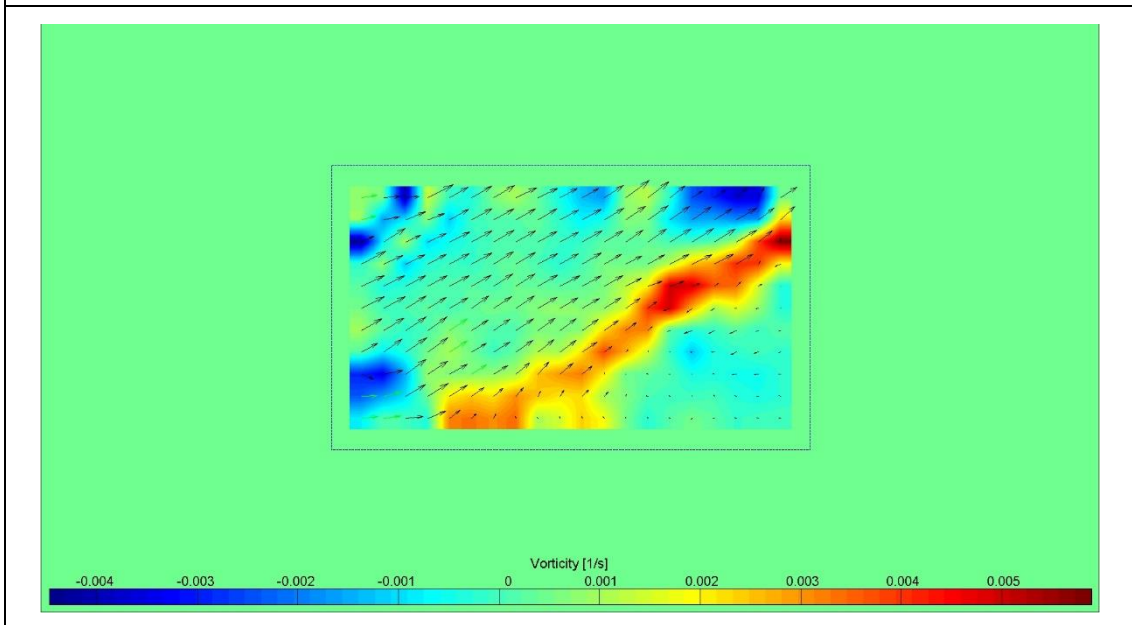
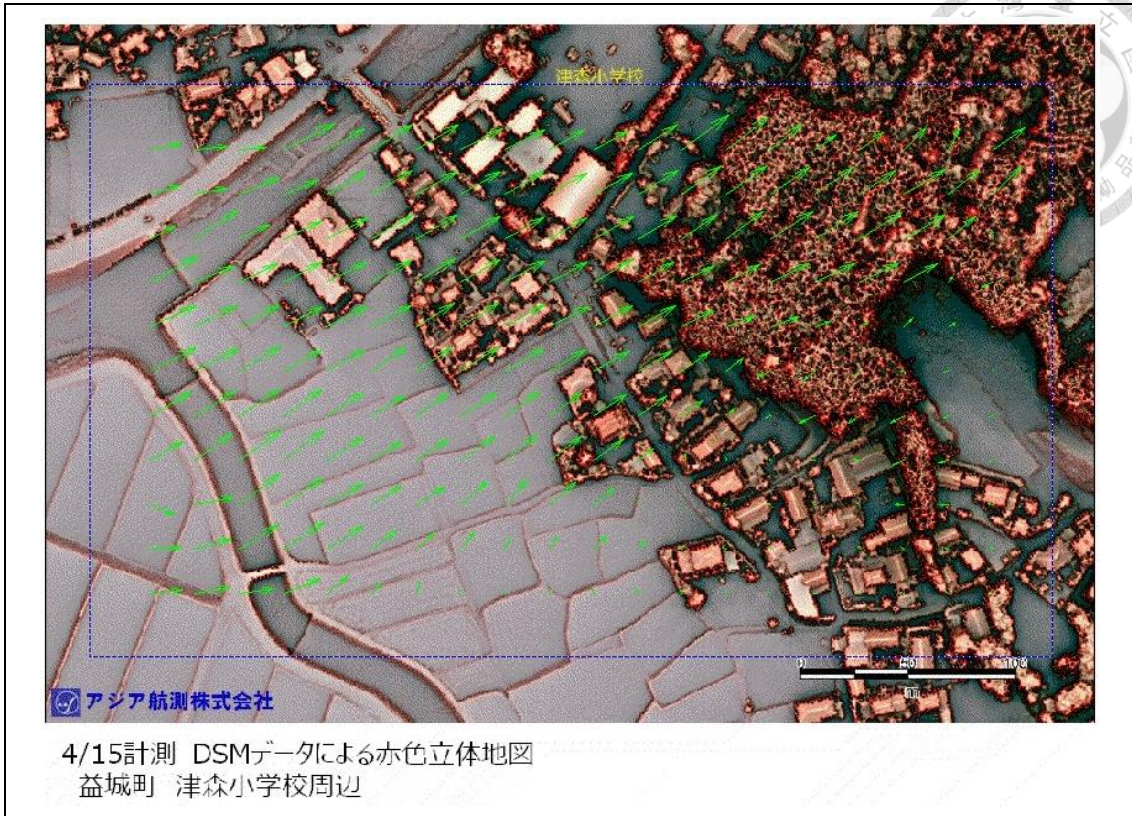


圖 6.8 調査點 A 位移(上)及位移場(下)分布

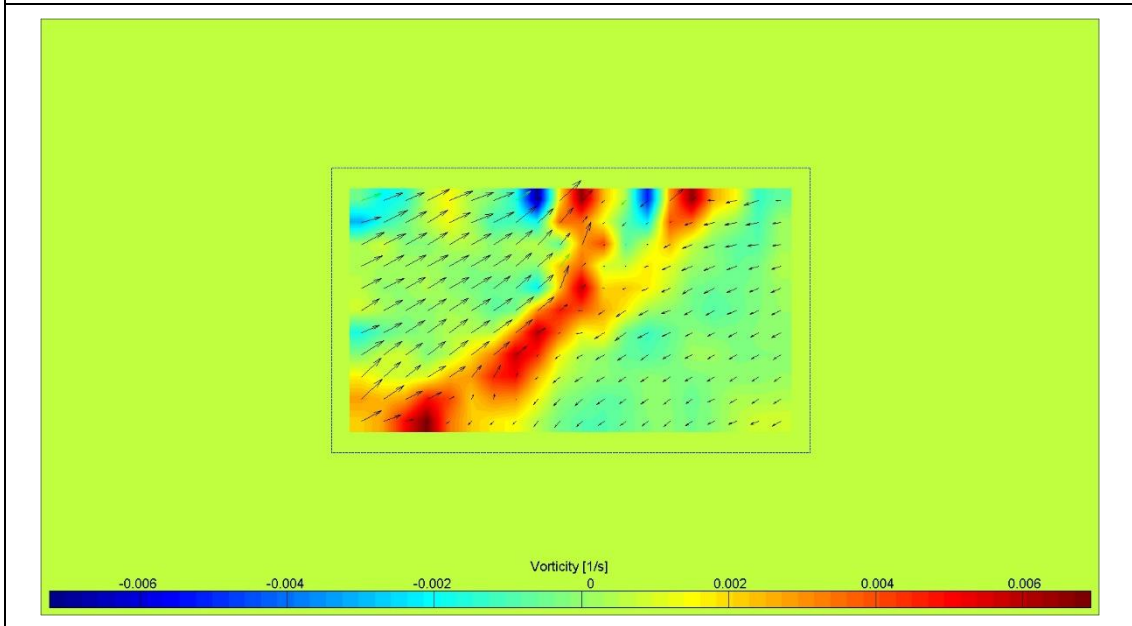
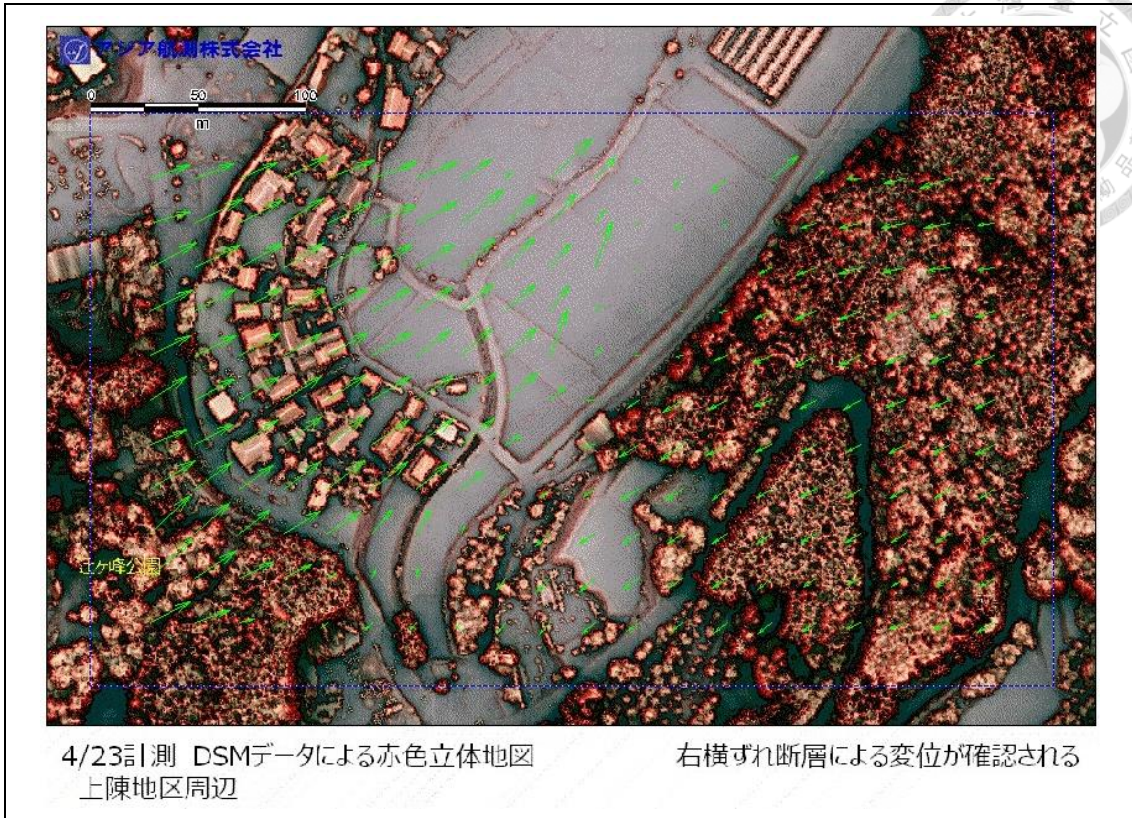


圖 6.9 調査點 B 位移(上)及位移場(下)分布



(a)擬合本次事件前一模型 1(m1r2)

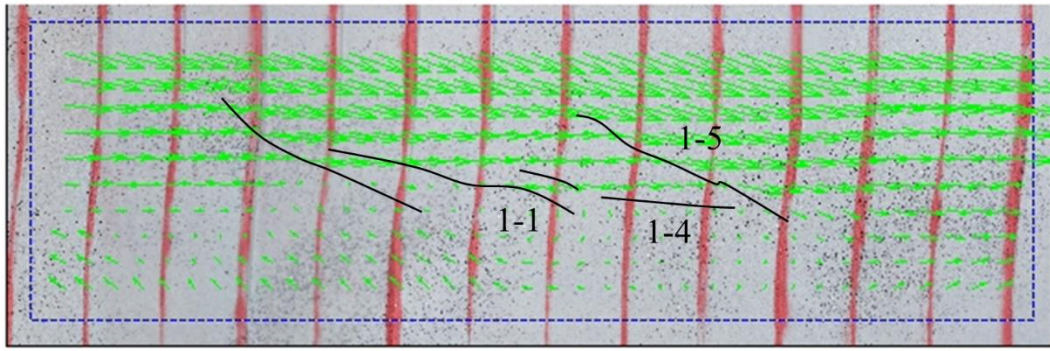


(b)擬合本次事件後一模型 1(m1r3)

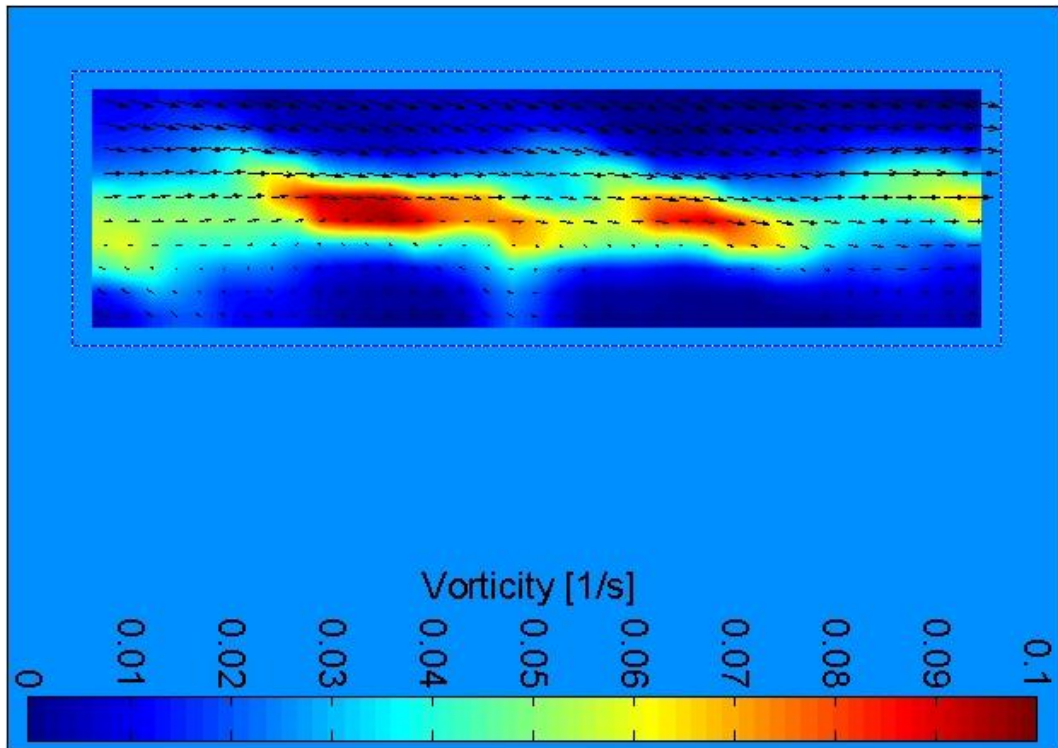


(c)推估下次事件一模型 1(m1r4)

圖 6.10 擬合事件各階段之砂箱模型

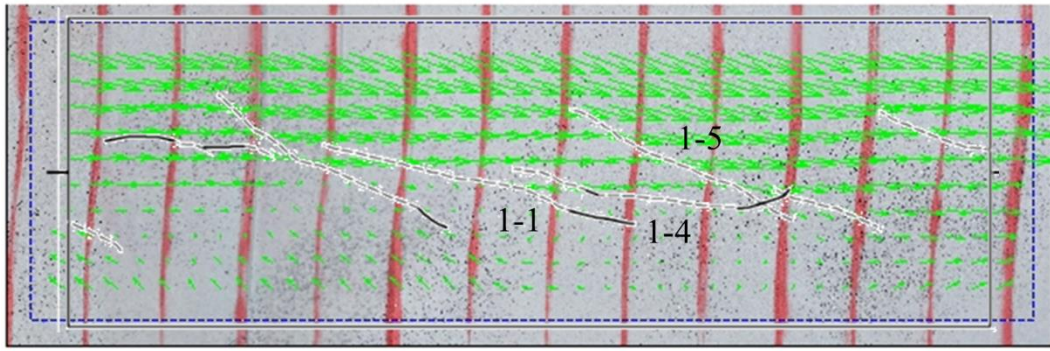


(a) 擬合事件前後期之位移圖

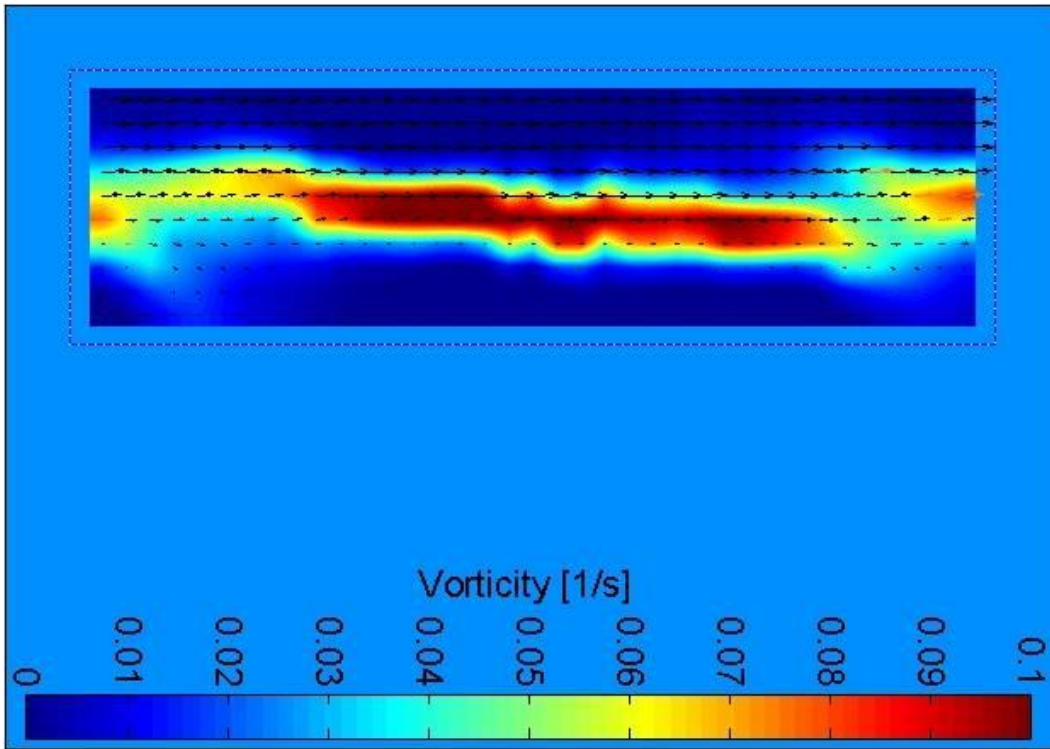


(b) 擬合事件前後期之位移場

圖 6.11 擬合事件砂箱之質點影像分析




(a) 推估下次事件之位移圖



(b) 推估下次事件之位移場

圖 6.12 推估下次事件砂箱之質點影像分析

第7章 討論



繪製走向滑移、傾向滑移及斜移斷層模型，其中走向滑移斷層(圖 7.1)之上覆土層變形，於地表顯示雁型排列破裂跡，地貌上丘谷地形特徵顯著，土中破裂跡發育大致對稱於斷層投影線；傾向滑移斷層(圖 7.2)之上覆土層變形，地形受到高程差影響，抬升側具有顯著崩崖，下降側材料堆積，地表破裂跡向下降側偏態，地貌上優勢坡向特徵顯著，土中斷層面發育受到地表材料運移到下降側影響，具有明顯的折角；斜向滑移斷層(圖 7.3)之上覆土層變形，為上述兩種斷層類型作用之綜合，地形受到高程差影響，抬升側具有顯著崩崖，下降側材料堆積外亦有雁型破裂跡，地表破裂跡向下降側偏態，地貌上具有優勢坡向特徵，土中斷層面發育亦受到地表材料運移到下降側影響，具有明顯的折角。

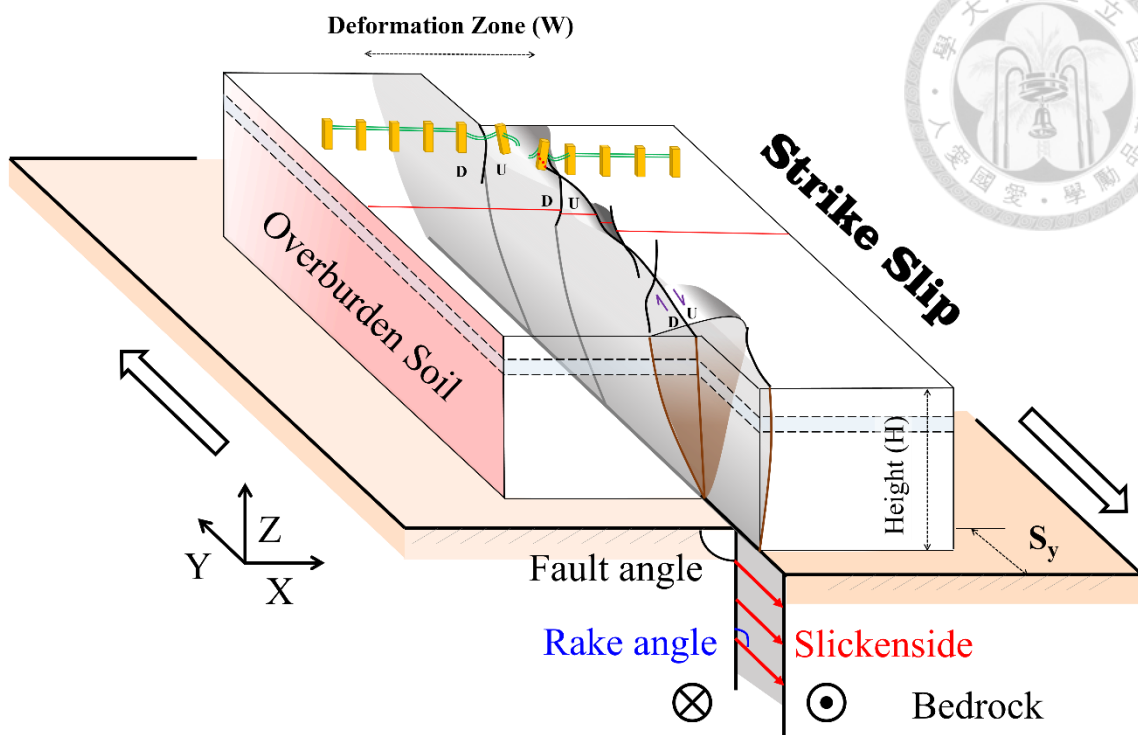


圖 7.1 走向滑移模型示意圖

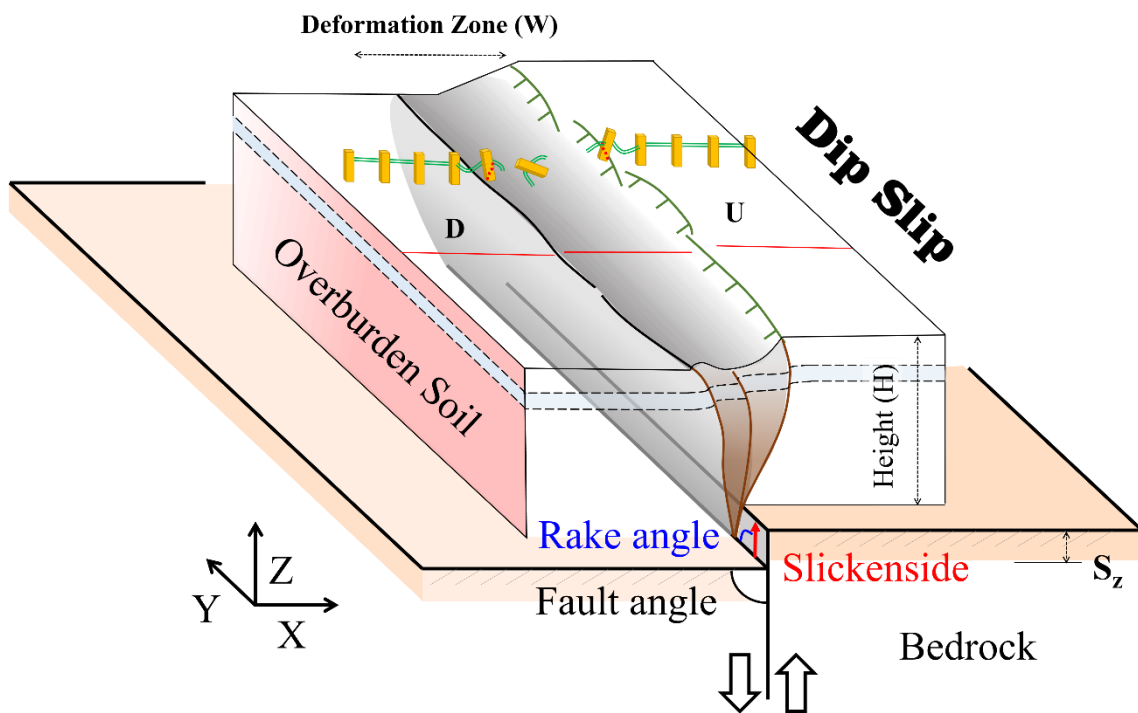


圖 7.2 傾向滑移模型示意圖

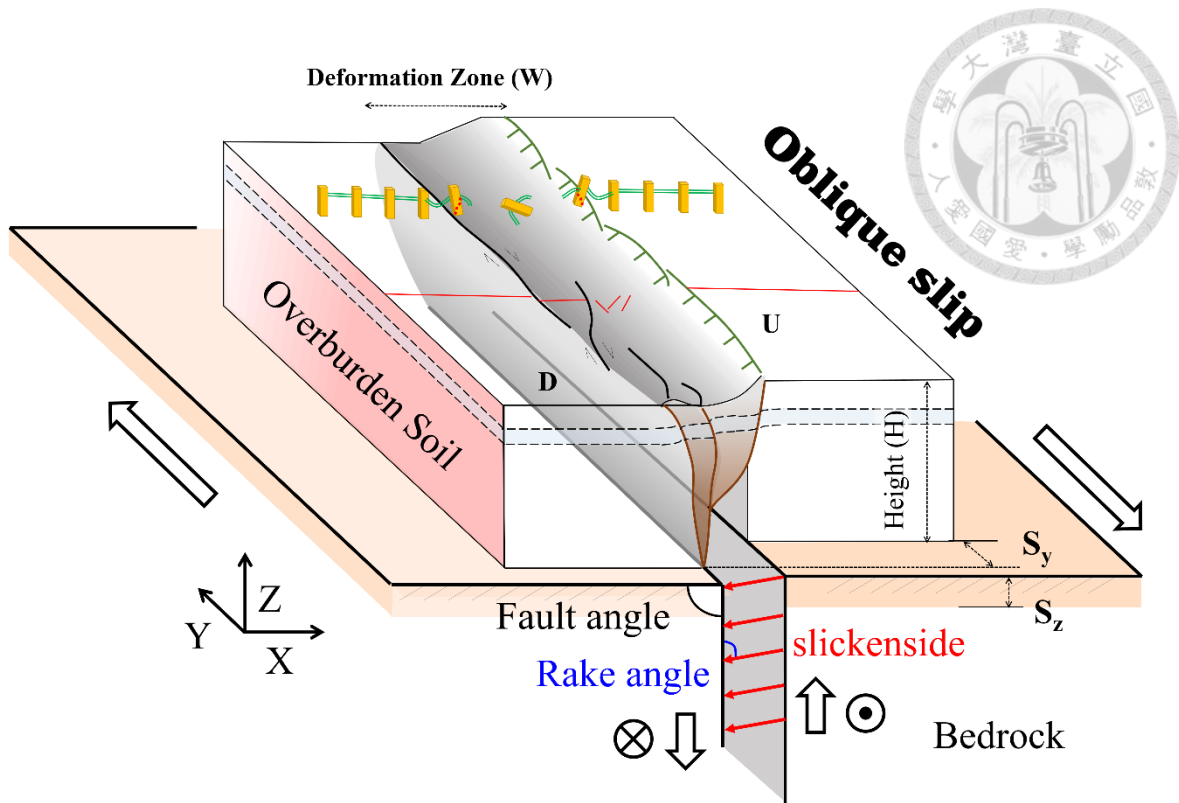


圖 7.3 斜向滑移模型示意圖

第8章 結論與建議



8.1 結論

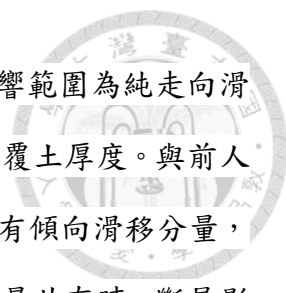
本研究使用無凝聚性砂土模擬上覆土層，進行小尺度 90 度斷層砂箱實驗，以探討傾向滑移分量及走向滑移分量比，對斜移斷層作用引致上覆土層變形行為。並透過地質鑽井取樣之岩心調查建立基盤斷層面調查方法，及野外調查斷層破裂跡形貌，

日本熊本地震事件，既有現地踏勘確認主斷層於地表最大平移量達 2 公尺，最大垂直位移量約 70 公分，而分支斷層水平位移量約 1.3~1 公尺，垂直位移量約 40 公分。現地踏勘資料亦顯示部分地區地表僅有水平位移或僅有垂直位移，此現象與正逆斷層(傾向滑移)活動時，常見斷層沿線地表破裂一致較不相同。

整合歷史事件調查，斷層作用後若斷層面出露地表可透過斷層擦痕線理與水平夾角的滑移角(Rake angle)表示滑動方向，若未出露地表，則可透過斷層面解反求斷層面滑移方向，將所得滑移量繪圖，其中台灣地區地震活動斷層滑移方向顯示多數斷層為逆衝伴隨右移分量。

為瞭解斷層作用下不同滑移角及滑移比對上覆土層變形影響，本研究簡化假設斷層傾角 90° ，針對滑移角、基盤滑移比及覆土厚度等，共設計八組不同條件之試驗，而地表破裂跡所勾勒的地貌分布屬於一次近似(approximation of first degree)，為最顯著觀察的項目，單就平移模型地表高程討論，結果顯示錯動初期，平均地表高程隆起顯著變化，結合等高線觀察，滑移比達 0.15 時地貌形成丘谷地形，而後期再錯動，對既有地形高程差異不大。

地表破裂跡線形的角度，隨著滑移量增加，破裂跡與斷層面投影的夾角會到達一個峰值後下降，而角度最大值約坐落在滑移比 0.2 時，夾角約 ± 40 度。利用覆土厚度正規化地表新生破裂跡總長度，亦有一峰值，當滑移比大於 0.2 時，破裂跡長度比下降，而最大值落在模型 3 斜移斷層試驗，滑移比為 0.14 時，長度比為 4.16。



針對地表影響範圍，採用地表指準層錯位統計分析，最大影響範圍為純走向滑移斷層，影響範圍約為對稱出現於斷層投影線兩側，合計約 1 倍覆土厚度。與前人文獻統計平均值為 0.8 倍覆土厚度，結果相當。當斷層活動時具有傾向滑移分量，影響範圍位置將會偏態，移至地形陷落側，而走向及傾向滑移分量共存時，斷層影響範圍較純走向滑移模型小，約為 0.5 倍覆土厚度。

地貌分析以坡向變化為主，顯示原平坦地面受到斷層作用擠壓伸張後坡向的變化，而傾向滑移分量顯著影響坡向方位，地形上呈現平行斷層的崖坡面，而坡向面對陷落側，意指正斷層則地形坡向面對上盤，逆斷層則地形坡向面對下盤，優勢坡向面積比可達 50% 以上；當傾向錯移量與走向錯移量一致時，坡向方位主要受傾向滑移影響，優勢坡向面積比達 40% 以上，亦可指示斷層線形，回歸斷層滑移角與地表優勢坡向面積比之關係，得到 2 次多項式分布，分析試驗值顯示推估效果良好。

由剖面觀察不同斷層滑移角試驗，結果顯示具有走向滑移模型，在不同剖面位置其土中斷層面數量不一，走向滑移斷層問題，的確為三維問題，而當具有傾向滑移之模型，斷層尖端開始向上時，其斷層面角度較陡；當斷層尖端擴展接近地表時，其角度變緩，顯示地形上高程差會擠壓斷層面至地勢較低區域，且約由覆土厚 1/3 之處起斷層面角度顯著改變。

現地案例選用 2016 熊本地震與砂箱試驗進行比對，於剖面比對推論此區斷層主要為走向滑移，於地表破裂跡比對顯示模型 1 的地貌表徵可以比擬，且推測下期事件破裂跡可能影響區域，利用現地錯位量及砂箱成果之錯位比(y_{ni}/H)，推估現地土層厚度，結果為 6.8 至 8.8 公尺。然而砂箱模型已簡化土層材料性質，未來仍可針對該區土層材料特性，進行案例分析與模擬。

8.2 建議

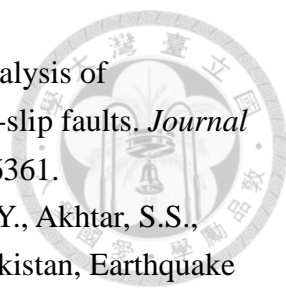
斷層作用具有重複性，隨斷層作用過程中，地表地形特徵易在斷層兩側保留，由研究結果顯示，傾向滑移分量高度影響地表坡向方位，透過廣域地貌分析地表線形地貌，可以初步判斷斷層形式、上覆土層厚度及影響範圍。惟斷層作用尚受到上覆土層材料等因素之影響，具有極大不確定性，想要明確掌握斷層破裂延伸在近地表的發展，尚有許多研究努力的空間。針對未來可進一步研究的部分，分述如下：

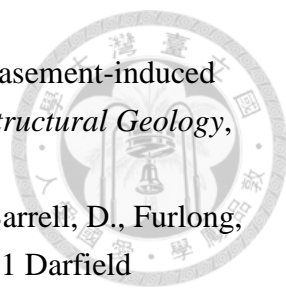
1. 本研究主要針對砂土層作為上覆土層材料為主，而現地土壤常為砂；黏土層互層，因此對於黏土層、砂/黏土層互層材料仍須待未來之研究。
2. 現階段砂箱模型為 90 度，建議可設計不同斷層傾角，以探討更符合自然界斷層面特徵。
3. 在砂箱物理試驗中，其影響帶分布、影響帶範圍內土層擾動情形等，可由分離元素軟體探討砂土之分離或滾動現象，作為進一步模擬量化分析及工程應用。
4. 熊本地震後，日本政府及民間陸續有許多挖溝剖面之實例，可作為研究成果比對之參考，未來應與古地震槽溝開挖剖面之結果綜合比對，以獲得準確合理之結果。

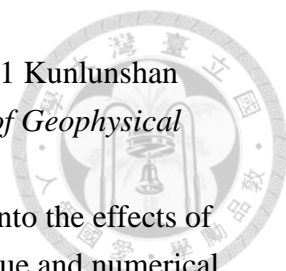
參考文獻



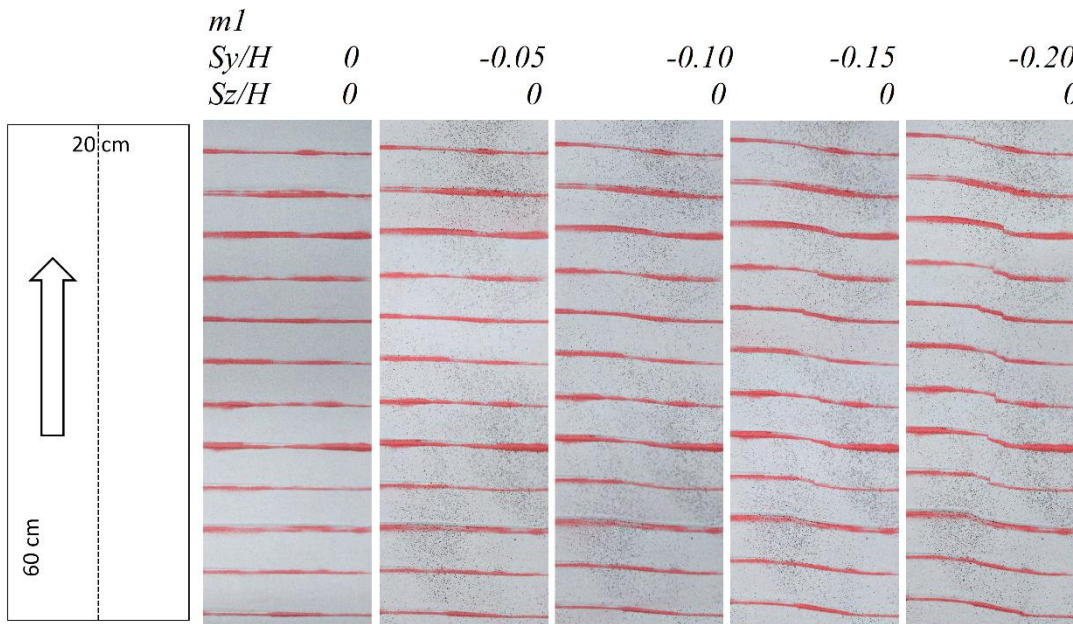
- Boncio, P., Galli, P., Naso, G. & Pizzi, A. 2012. Zoning Surface Rupture Hazard along Normal Faults: Insight from the 2009 Mw 6.3 L'Aquila, Central Italy, Earthquake and Other Global Earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **102**, 918-935, <http://doi.org/10.1785/0120100301>.
- Chan, P.C., Li, c.h. & Lin, M.L. 2016. Evolution of Overburden Soil Deformation by Oblique-slip Faulting from Analogue Models. *7th Taiwan-Japan Workshop on Geotechnical Hazards from Large Earthquakes and Heavy Rainfall*, PingTung, Taiwan.
- Chang, Y., Lee, C., Huang, W., Huang, W., Lin, M., Hung, W. & Lin, Y. 2013. Use of centrifuge experiments and discrete element analysis to model the reverse fault slip. *International Journal of Civil Engineering*, **11**, 79-89.
- Chiba, T., Kaneta, S.-i. & Suzuki, Y. 2008. Red relief image map: new visualization method for three dimensional data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **37**, 1071-1076.
- Christie-Blick, N. & Biddle, K.T. 1985. Deformation and Basin Formation along Strike-Slip Faults. *SEPM (Society for Sedimentary Geology) Special publication*, **37**, 1-34.
- Chu, S.-S., Lin, M.-L., Huang, W.-C., Liu, H.-C. & Chan, P.-C. 2013. Laboratory Simulation of Shear Band Development in a Growth Normal Fault. *Journal of GeoEngineering*, **8**, 19-26.
- Clifton, A. & Einarsson, P. 2005. Styles of surface rupture accompanying the June 17 and 21, 2000 earthquakes in the South Iceland Seismic Zone. *Tectonophysics*, **396**, 141-159, <http://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.11.007>.
- Dooley, T. & Schreurs, G. 2012. Analogue modelling of intraplate strike-slip tectonics: A review and new experimental results. *Tectonophysics*, **574**, 1-71, <http://doi.org/DOI 10.1016/j.tecto.2012.05.030>.
- Emmons, R. 1969. Strike-slip rupture patterns in sand models. *Tectonophysics*, **7**, 71-87.
- Gold, R.D., Reitman, N.G., Briggs, R.W., Barnhart, W.D., Hayes, G.P. & Wilson, E. 2015. On-and off-fault deformation associated with the September 2013 M w 7.7 Balochistan earthquake: implications for geologic slip rate measurements. *Tectonophysics*, **660**, 65-78.
- Hornblow, S., Quigley, M., Nicol, A., Van Dissen, R. & Wang, N. 2014. Paleoseismology of the 2010 Mw 7.1 Darfield (Canterbury) earthquake source, Greendale Fault, New Zealand. *Tectonophysics*, **637**, 178-190, <http://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.10.004>.

- 
- Huang, W.-J. & Johnson, A.M. 2010. Quantitative description and analysis of earthquake-induced deformation zones along strike-slip and dip-slip faults. *Journal of Geophysical Research*, **115**, <http://doi.org/10.1029/2009jb006361>.
- Kaneda, H., Nakata, T., Tsutsumi, H., Kondo, H., Sugito, N., Awata, Y., Akhtar, S.S., Majid, A., *et al.* 2008. Surface Rupture of the 2005 Kashmir, Pakistan, Earthquake and Its Active Tectonic Implications. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **98**, 521-557, <http://doi.org/10.1785/0120070073>.
- Kelson, K.I., Kang, K.-H., Page, W.D., Lee, C.-T. & Cluff, L.S. 2001. Representative styles of deformation along the Chelungpu fault from the 1999 Chi-Chi (Taiwan) earthquake: geomorphic characteristics and responses of man-made structures. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **91**, 930-952.
- Khajavi, N., Quigley, M. & Langridge, R.M. 2014. Influence of topography and basement depth on surface rupture morphology revealed from LiDAR and field mapping, Hope Fault, New Zealand. *Tectonophysics*, **630**, 265-284, <http://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.05.032>.
- Lazarte, C. & Bray, J. 1996. A study of strike-slip faulting using small-scale models. *ASTM geotechnical testing journal*, **19**, 118-129.
- Le Guerroué, E. & Cobbold, P.R. 2006. Influence of erosion and sedimentation on strike-slip fault systems: insights from analogue models. *Journal of Structural Geology*, **28**, 421-430, <http://doi.org/10.1016/j.jsg.2005.11.007>.
- Li, C.-Y., Wei, Z.-Y., Ye, J.-Q., Han, Y.-B. & Zheng, W.-J. 2010. Amounts and styles of coseismic deformation along the northern segment of surface rupture, of the 2008 Wenchuan Mw 7.9 earthquake, China. *Tectonophysics*, **491**, 35-58, <http://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.09.023>.
- Lin, A. & Nishikawa, M. 2011. Riedel shear structures in the co-seismic surface rupture zone produced by the 2001 Mw 7.8 Kunlun earthquake, northern Tibetan Plateau. *Journal of Structural Geology*, **33**, 1302-1311, <http://doi.org/10.1016/j.jsg.2011.07.003>.
- Lin, A., Toda, S., Rao, G., Tsuchihashi, S. & Yan, B. 2013. Structural Analysis of Coseismic Normal Fault Zones of the 2011 Mw 6.6 Fukushima Earthquake, Northeast Japan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **103**, 1603-1613, <http://doi.org/10.1785/0120120111>.
- Lin, M.-L., Chung, C.-F. & Jeng, F.-S. 2006. Deformation of overburden soil induced by thrust fault slip. *Engineering Geology*, **88**, 70-89, <http://doi.org/DOI.10.1016/j.enggeo.2006.08.004>.
- Lin, M.-L., Chung, C.-F., Jeng, F.-S. & Yao, T.-C. 2007. The deformation of overburden soil induced by thrust faulting and its impact on underground tunnels. *Engineering Geology*, **92**, 110-132.

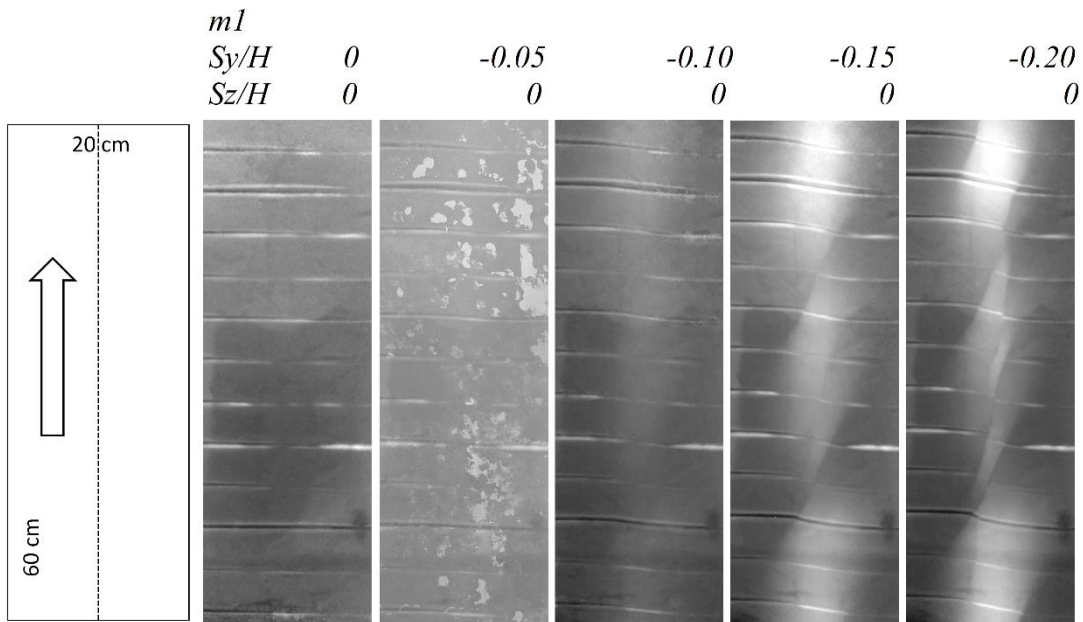
- 
- Naylor, M., Mandl, G.t. & Supesteijn, C. 1986. Fault geometries in basement-induced wrench faulting under different initial stress states. *Journal of Structural Geology*, **8**, 737-752, [http://doi.org/Doi 10.1016/0191-8141\(86\)90022-2](http://doi.org/Doi 10.1016/0191-8141(86)90022-2).
- Quigley, M., Van Dissen, R., Litchfield, N., Villamor, P., Duffy, B., Barrell, D., Furlong, K., Stahl, T., *et al.* 2011. Surface rupture during the 2010 Mw 7.1 Darfield (Canterbury) earthquake: Implications for fault rupture dynamics and seismic-hazard analysis. *Geology*, **40**, 55-58, <http://doi.org/10.1130/g32528.1>.
- Shirahama, Y., Yoshimi, M., Awata, Y., Maruyama, T., Azuma, T., Miyashita, Y., Mori, H., Imanishi, K., *et al.* 2016. Characteristics of the surface ruptures associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence, central Kyushu, Japan. *Earth, Planets and Space*, **68**, 191.
- Soto, R., Martinod, J. & Odonne, F. 2007. Influence of early strike-slip deformation on subsequent perpendicular shortening: An experimental approach. *Journal of Structural Geology*, **29**, 59-72, <http://doi.org/10.1016/j.jsg.2006.08.001>.
- Sylvester, A.G. 1988. Strike-slip faults. *Geological Society of America Bulletin*, **100**, 1666-1703.
- Tani, K., Ueta, K., Abe, S., Nakata, H. & Hayashi, H. 1997. Deformation structure of surface unconsolidated layer along the Nojima Earthquake Fault. *Doboku Gakkai Ronbunshu*, **1997**, 21-39.
- Thielicke, W. & Stamhuis, E. 2014. PIVlab—towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB. *Journal of Open Research Software*, **2**.
- Toscani, G., Di Bucci, D., Ravaglia, A., Seno, S., Fracassi, U. & Valensise, G. 2009. Propagation of an inherited strike-slip fault through a foreland-chain system: quantitative aspects from analogue modeling and applications. *Bollettino della Società geologica italiana*, **128**, 107-122.
- Treiman, J.A., Kendrick, K.J., Bryant, W.A., Rockwell, T.K. & McGill, S.F. 2002. Primary surface rupture associated with the mw 7.1 16 october 1999 hector mine earthquake, san bernardino county, california. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **92**, 1171-1191.
- Ueta, K., Tani, K. & Kato, T. 2000. Computerized X-ray tomography analysis of three-dimensional fault geometries in basement-induced wrench faulting. *Engineering Geology*, **56**, 197-210.
- Wang, H., Ran, Y., Chen, L., Shi, X., Liu, R. & Gomez, F. 2010. Determination of horizontal shortening and amount of reverse-faulting from trenching across the surface rupture of the 2008 MW 7.9 Wenchuan earthquake, China. *Tectonophysics*, **491**, 10-20, <http://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.03.019>.
- Xu, X., Yu, G., Klinger, Y., Tapponnier, P. & Van Der Woerd, J. 2006. Reevaluation of

- 
- surface rupture parameters and faulting segmentation of the 2001 Kunlunshan earthquake (Mw7.8), northern Tibetan Plateau, China. *Journal of Geophysical Research*, **111**, <http://doi.org/10.1029/2004jb003488>.
- Zwaan, F., Schreurs, G., Naliboff, J. & Buiter, S.J.H. 2016. Insights into the effects of oblique extension on continental rift interaction from 3D analogue and numerical models. *Tectonophysics*, **693**, 239-260, <http://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.02.036>.
- 上田圭一 & 谷和夫. 1999. 基盤の断層変位に伴う第四紀層及び地表の変形状況の検討 (その 3)-横ずれ, 斜めずれ断層模型実験. *電力中央研究所報告 U*, **98049**, 1999.
- 地震調査研究推進本部. 2013. 布田川断層帯・日奈久断層帯の評価 (一部改訂).
- 池田安隆, 千田昇, 中田高, 金田平太郎, 田力正好 & 高沢信司. 2001. 都市圏活断層図〔熊本〕. *国土地理院技術資料 D.1-No.368*.
- 林啟文, 盧詩丁, 石同生, 劉彥求, 林偉雄 & 林燕慧. 2007. 台灣西南部的活動斷層. *經濟部中央地質調查所特刊*, **17**.
- 林啟文, 盧詩丁, 石同生, 林偉雄, 劉彥求 & 陳柏村. 2008. 台灣中部的活動斷層. *經濟部中央地質調查所特刊*, **21**.
- 林銘郎, 李崇正, 黃文正 & 黃文昭. 2014. 重要活動斷層構造特性調查研究活動斷層近地表變形特性研究. 經濟部中央地質調查所.
- 陳文山, 游能悌 & 楊小青. 2010. 地震地質與地變動潛勢分析計畫—斷層長期滑移速率與再現週期研究 (總報告).
- 蔡維哲. 2005. 應用航空影像分析於邊坡位移場之方法學研究. *臺灣大學土木工程學研究所學位論文*, 1-158.
- 鄧嘉欣, 羅偉, 陳柔妃 & 謝有忠. 2015. 利用高精度空載光達重新探討河流襲奪之問題: 以大甲溪與蘭陽溪為例. *鑛冶: 中國鑛冶工程學會會刊*, 120-127.

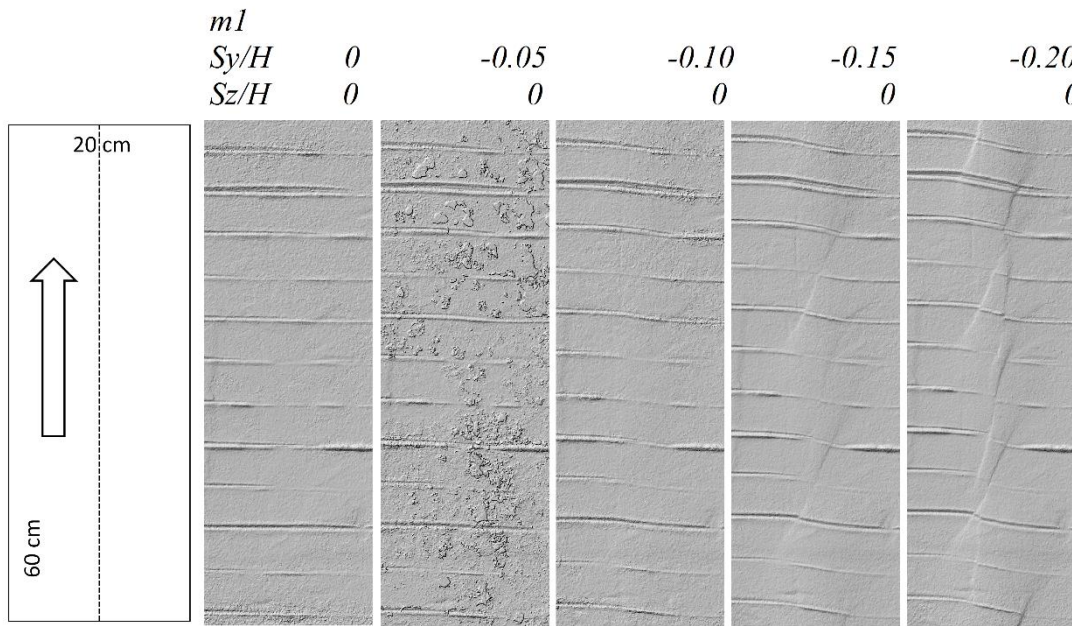
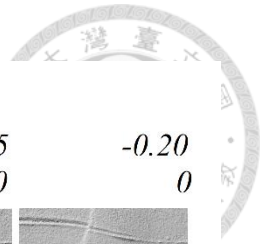
附錄 A 砂箱試驗地表成果圖



A-1 走向滑移(m1)正射影像圖

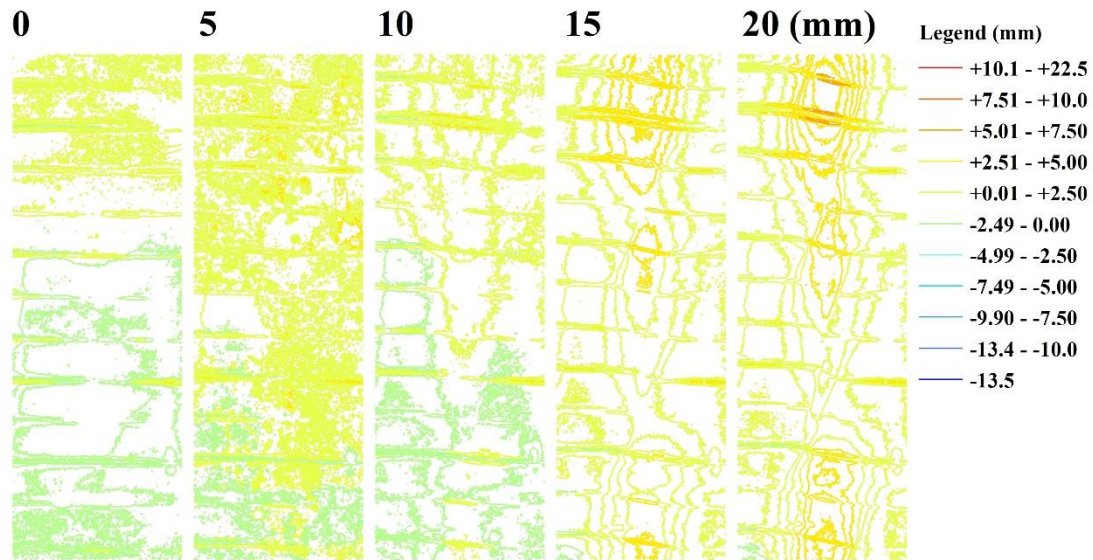


A-2 走向滑移(m1)數值地形高程圖

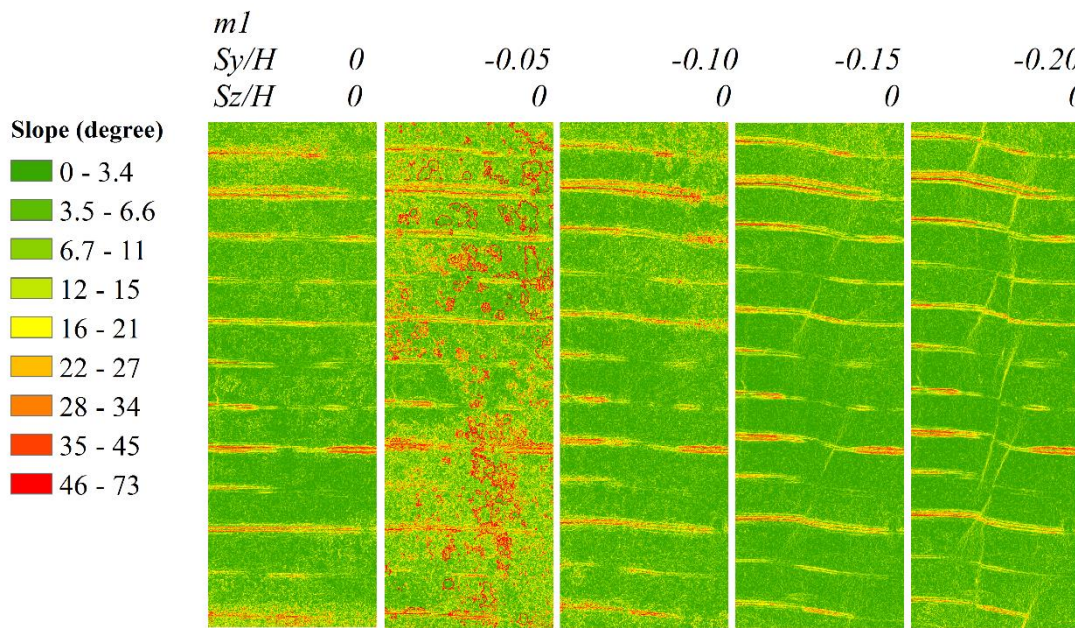
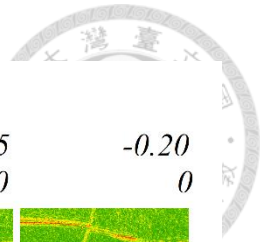


A-3 走向滑移(m1)日照陰影圖

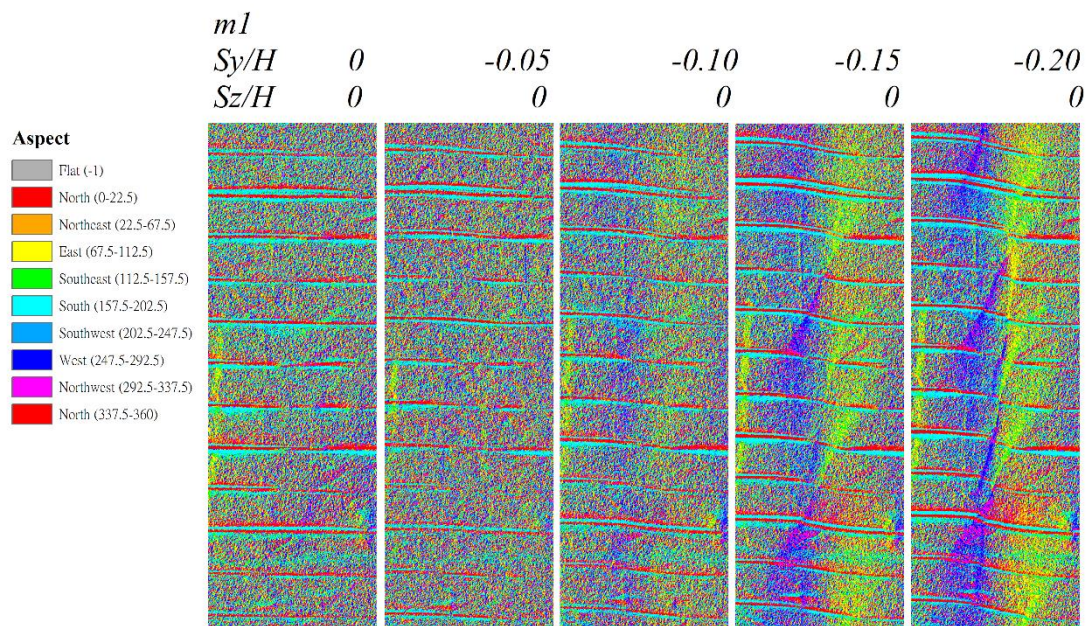
m1-Contour



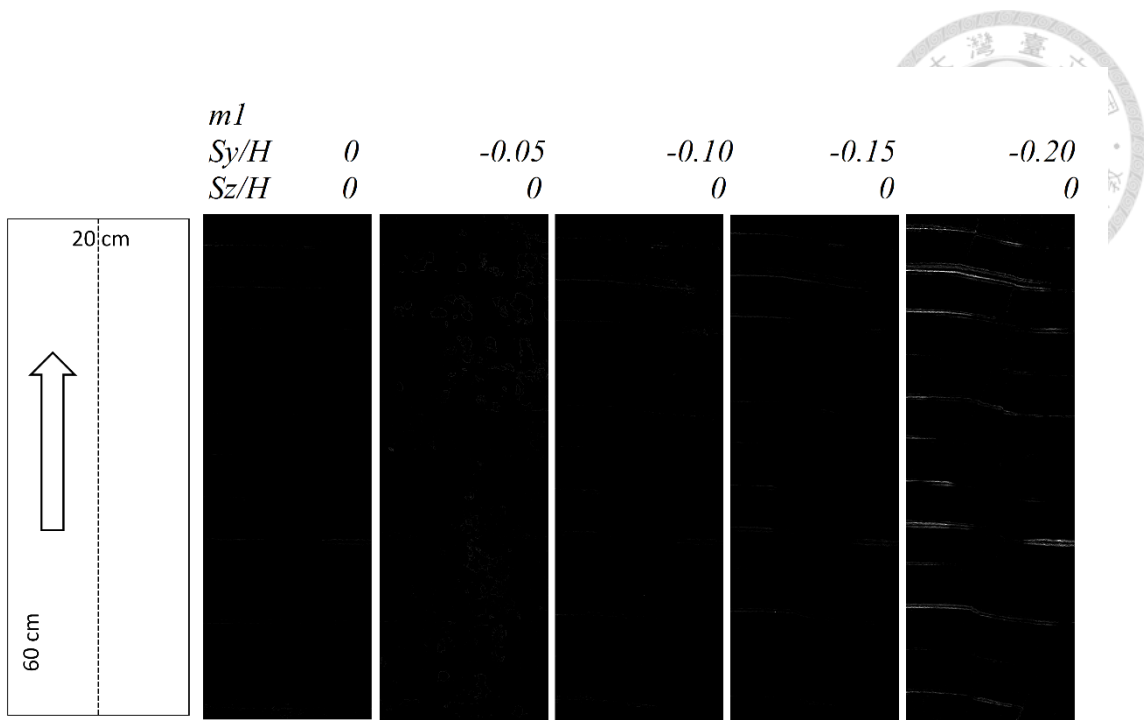
A-4 走向滑移(m1)等高線圖



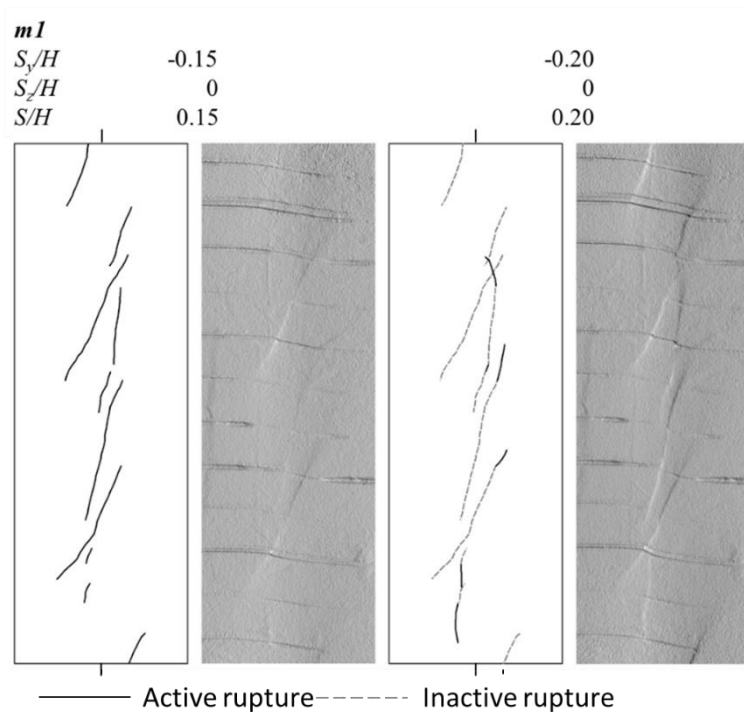
A-5 走向滑移(m1)坡度圖



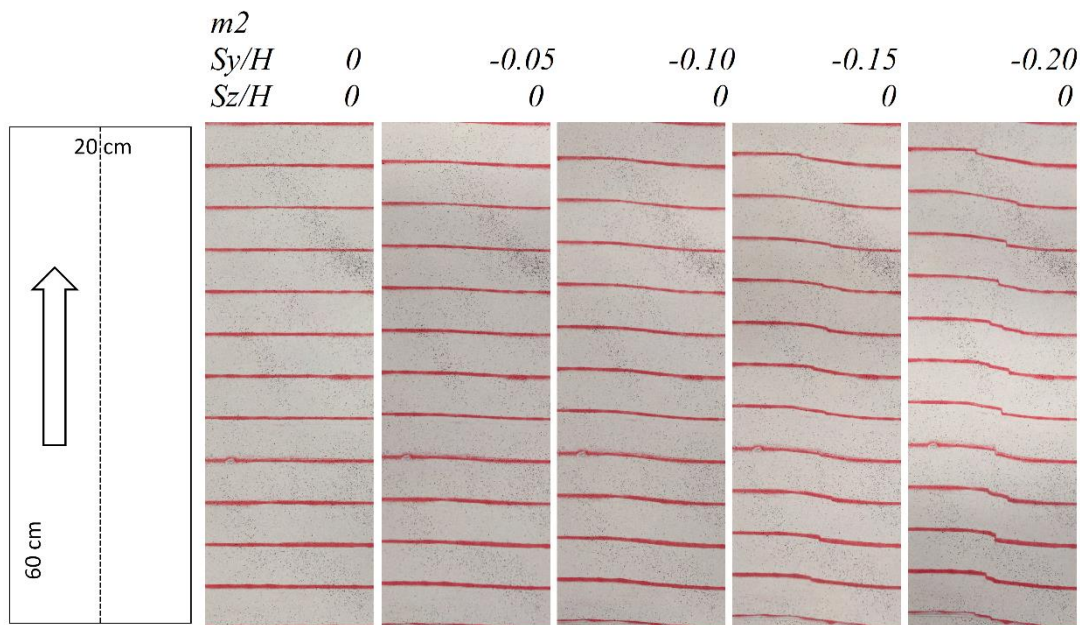
A-6 走向滑移(m1)坡向圖



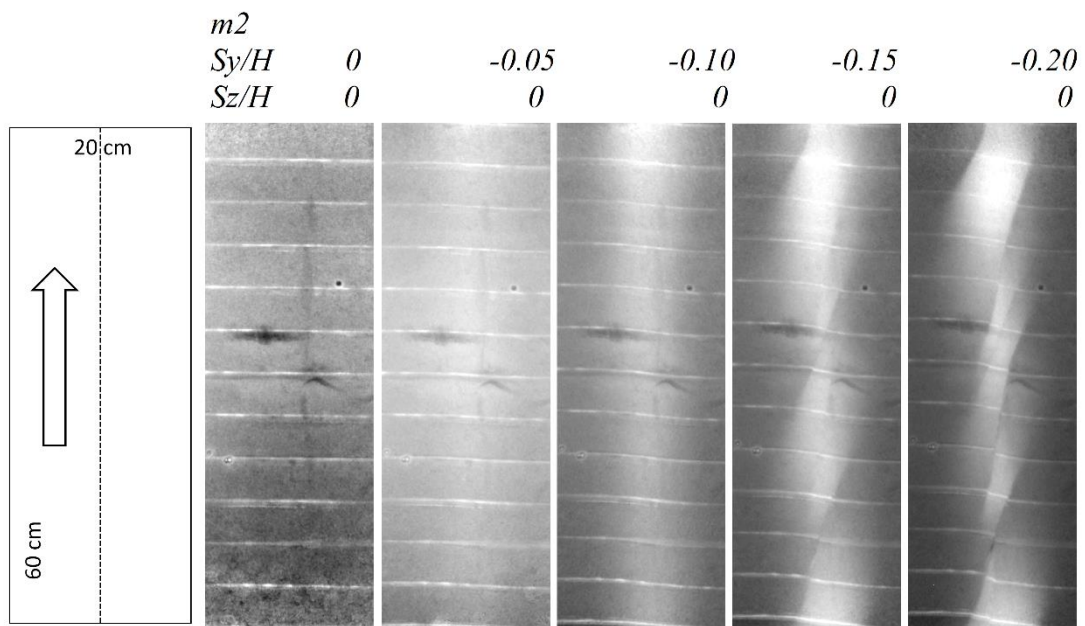
A-7 走向滑移(m1)粗糙度圖



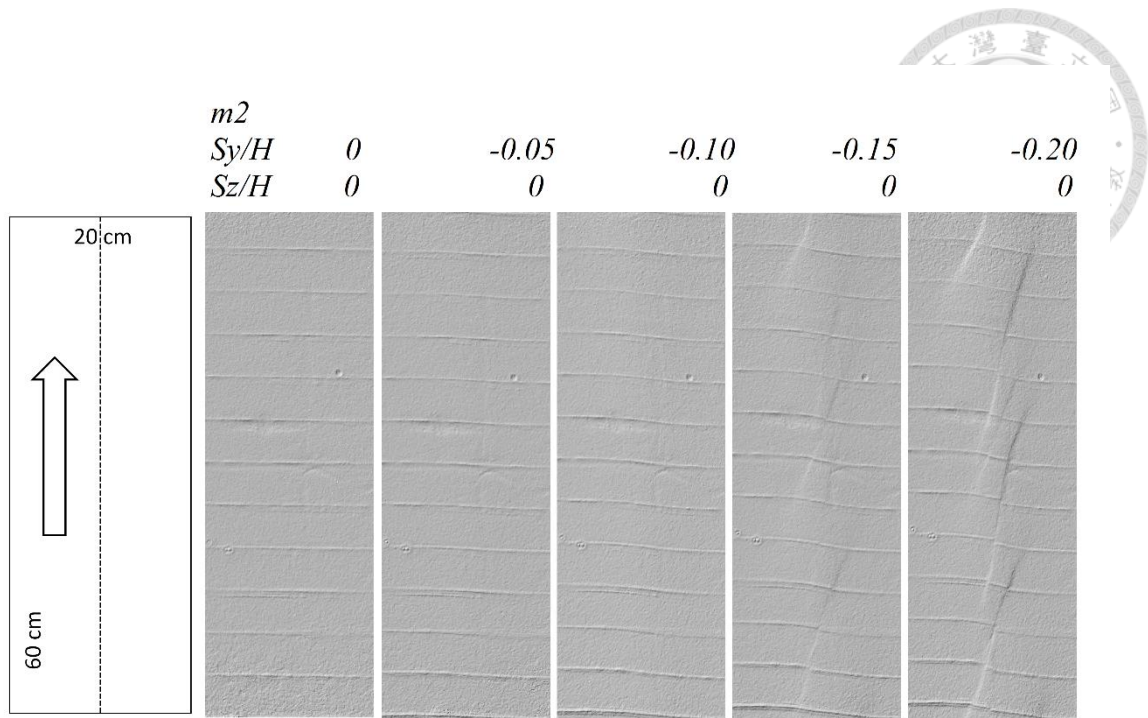
A-8 走向滑移(m1)地表線形



A-9 走向滑移($m2$)正射影像圖

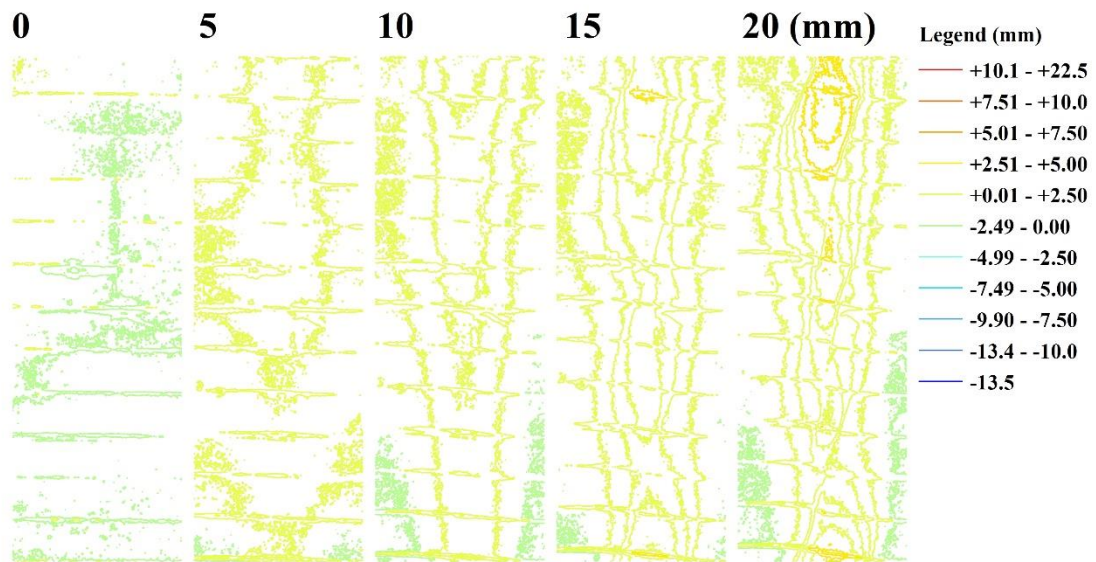


A-10 走向滑移($m2$)數值地形高程圖

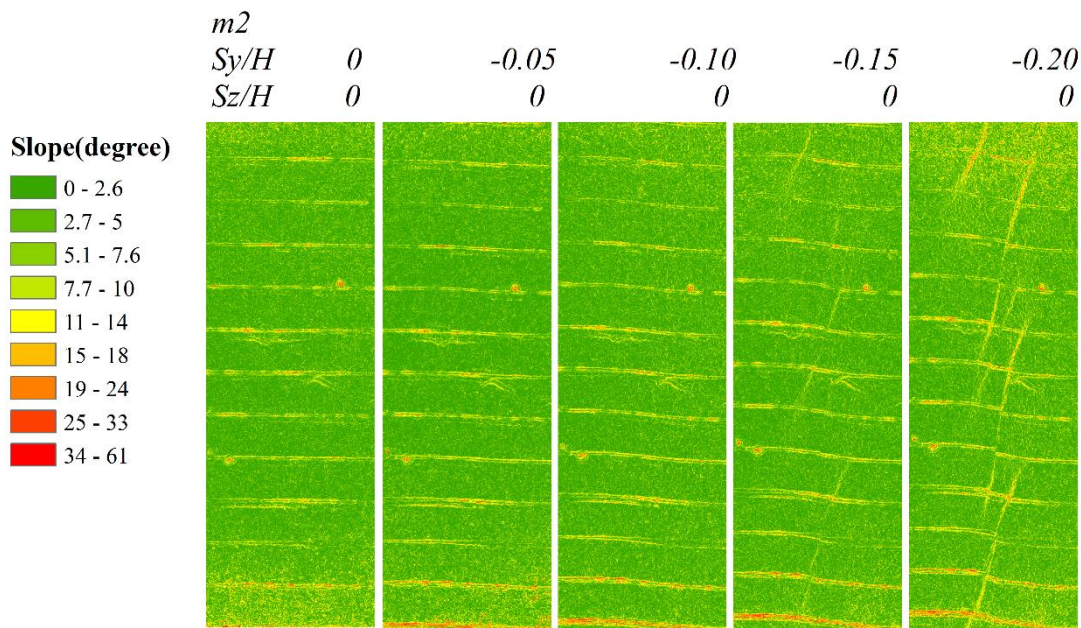
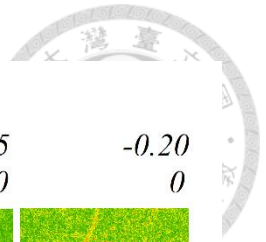


A-11 走向滑移($m2$)日照陰影圖

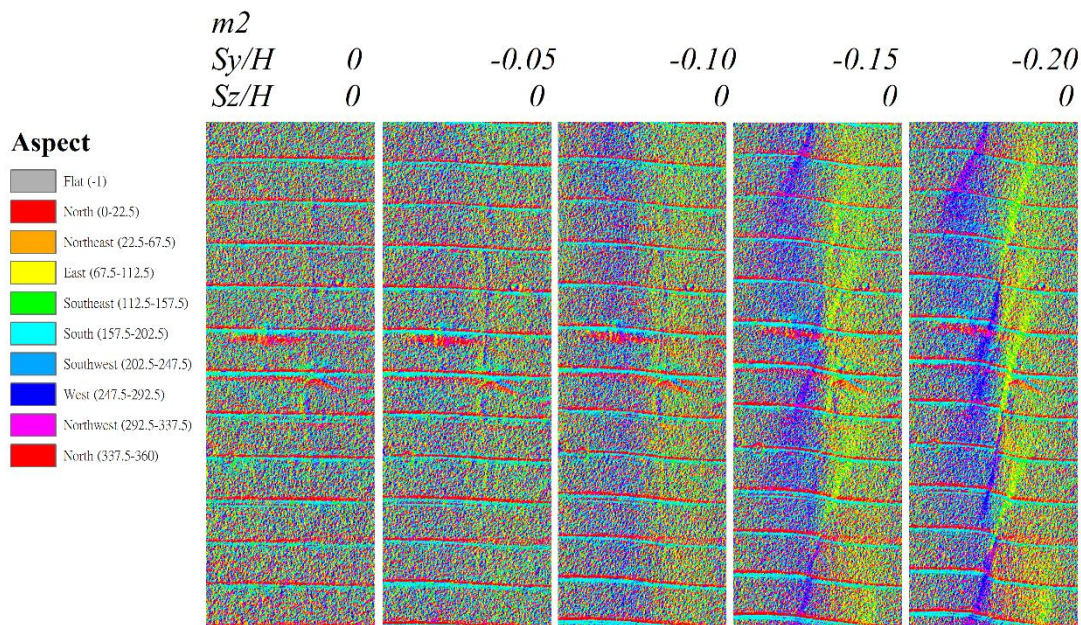
m2-Contour



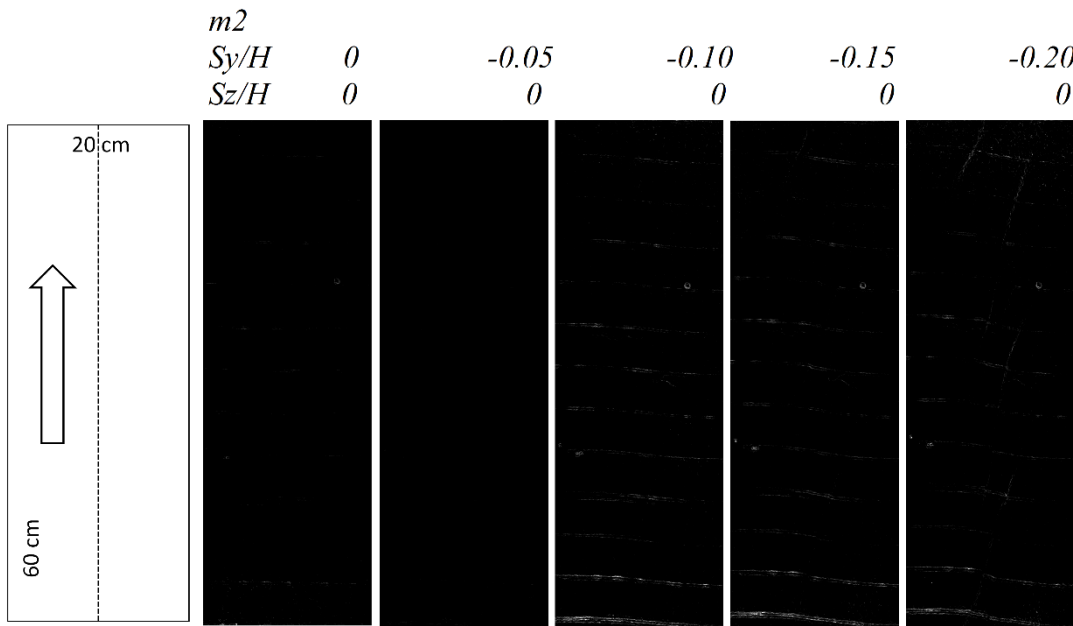
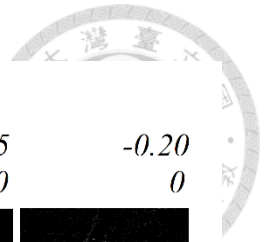
A-12 走向滑移($m2$)等高線圖



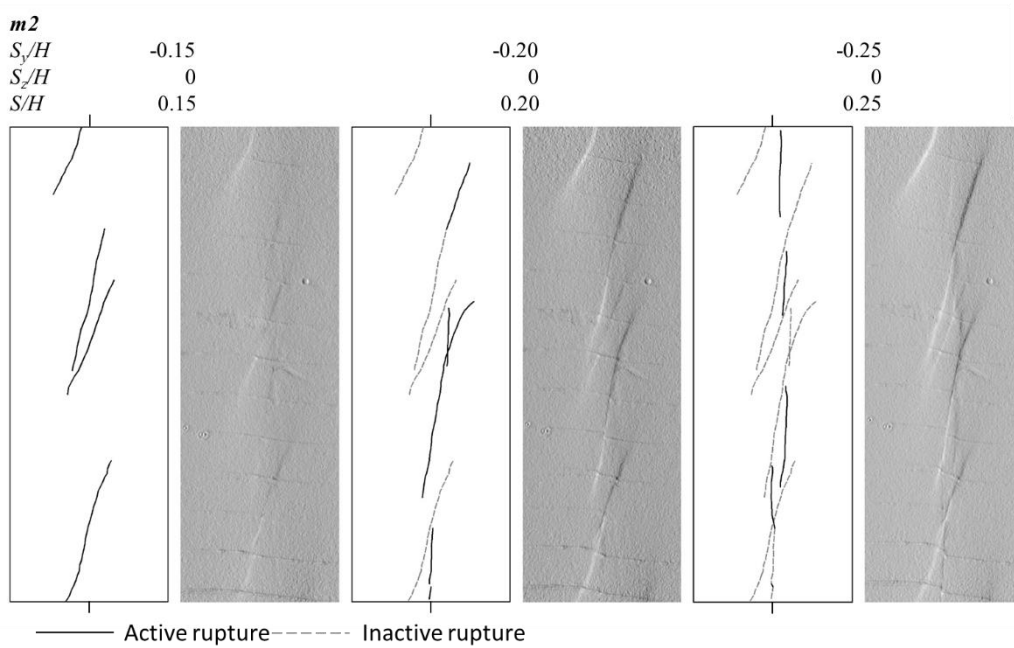
A-13 走向滑移(m2)坡度圖



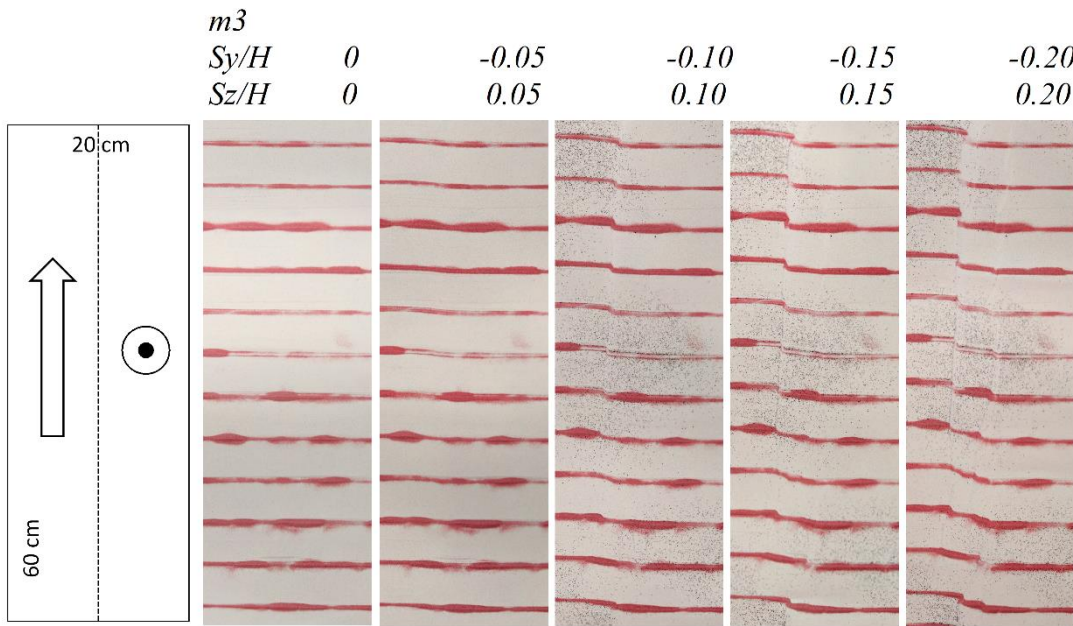
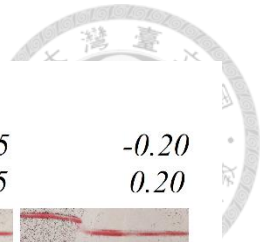
A-14 走向滑移(m2)坡向圖



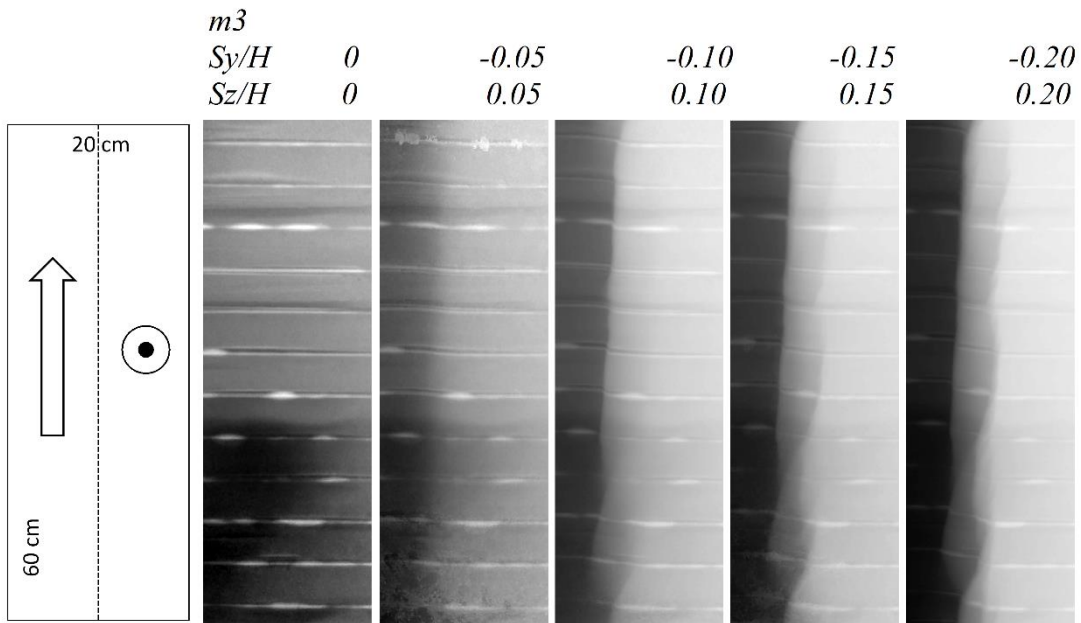
A-15 走向滑移(m2)粗糙度圖



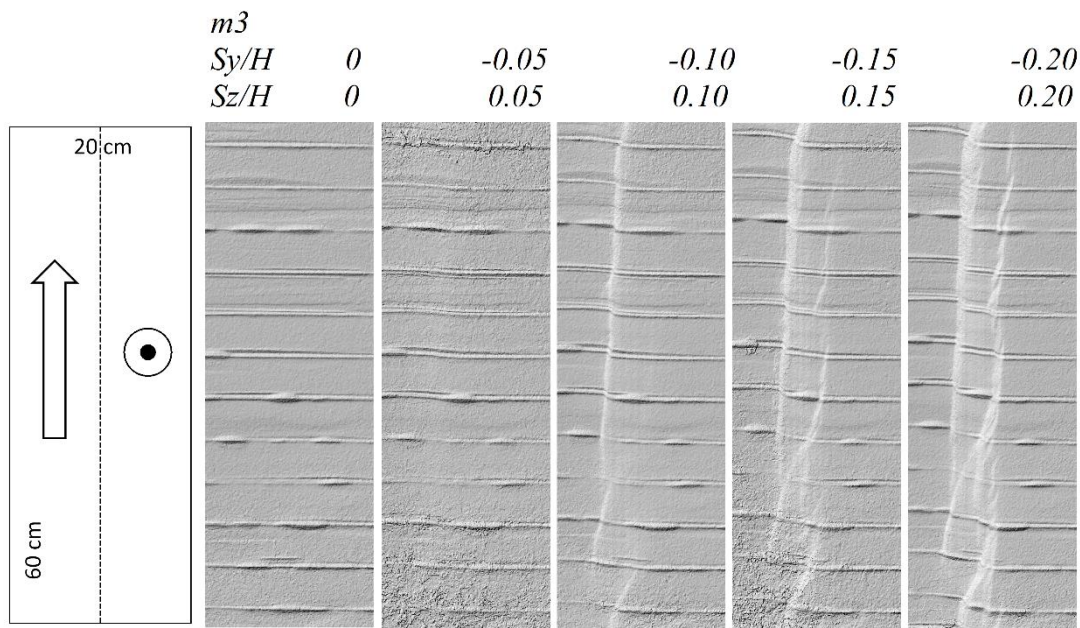
A-16 走向滑移(m2)地表線形



A-17 斜向滑移($m3$)正射影像圖

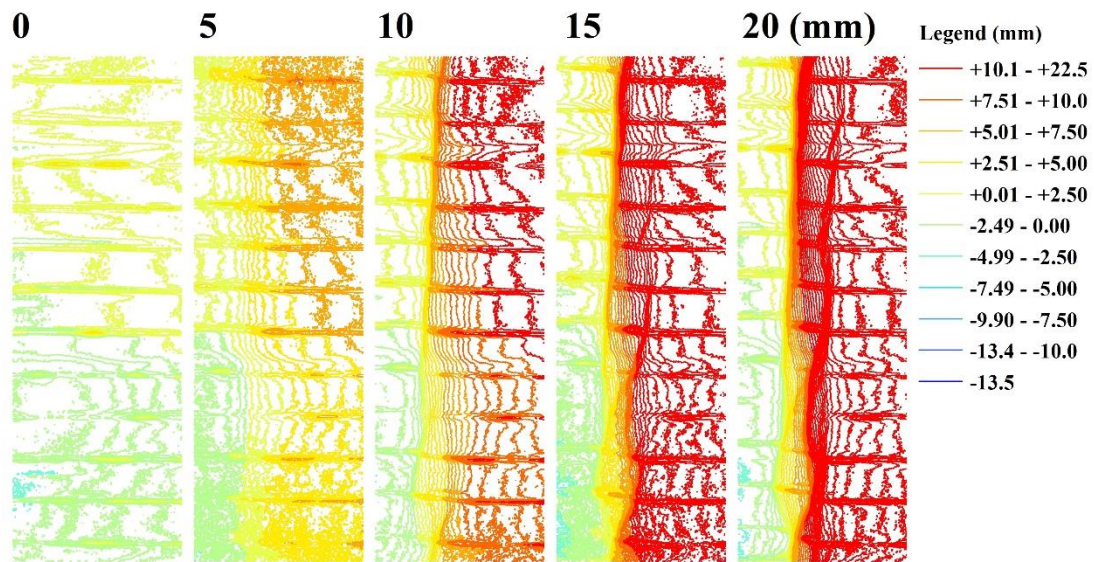


A-18 斜向滑移($m3$)數值地形高程圖

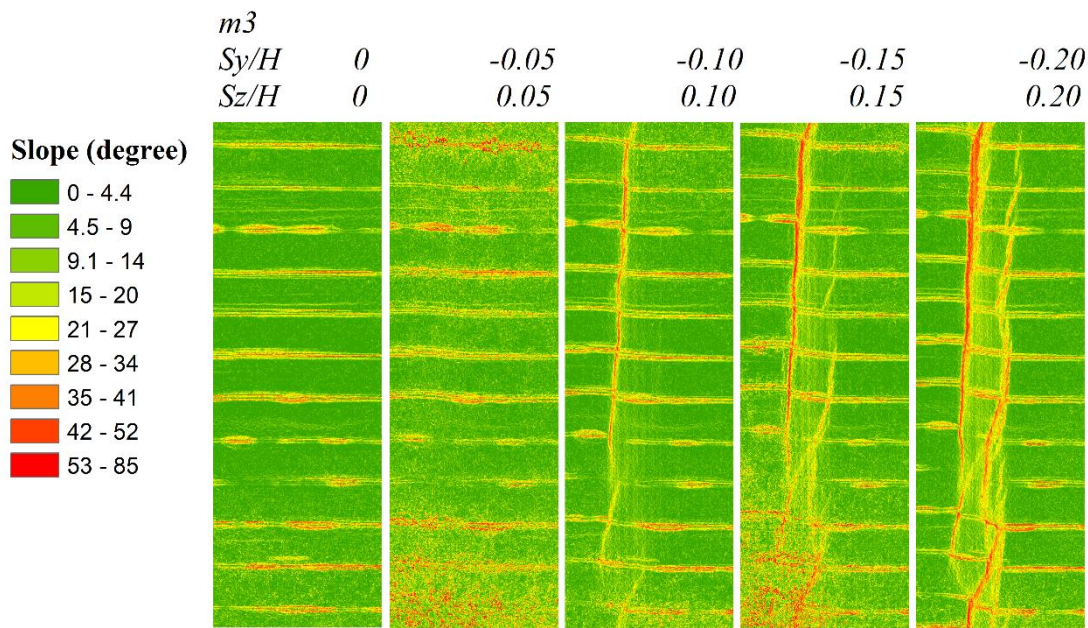
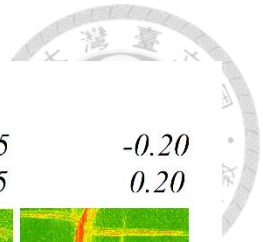


A-19 斜向滑移(m3)日照陰影圖

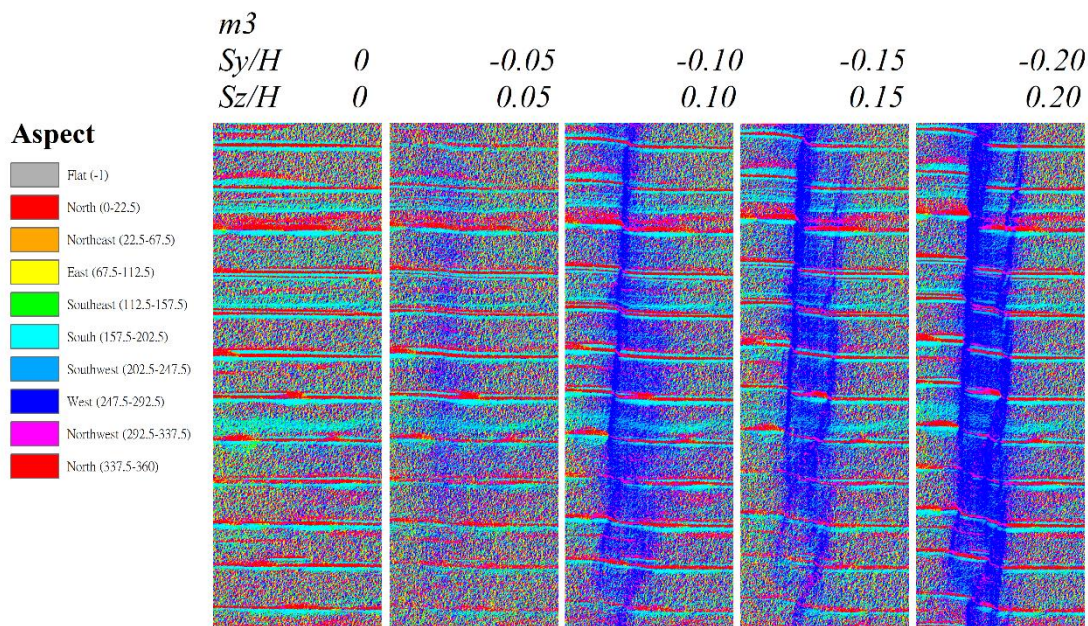
m3-Contour



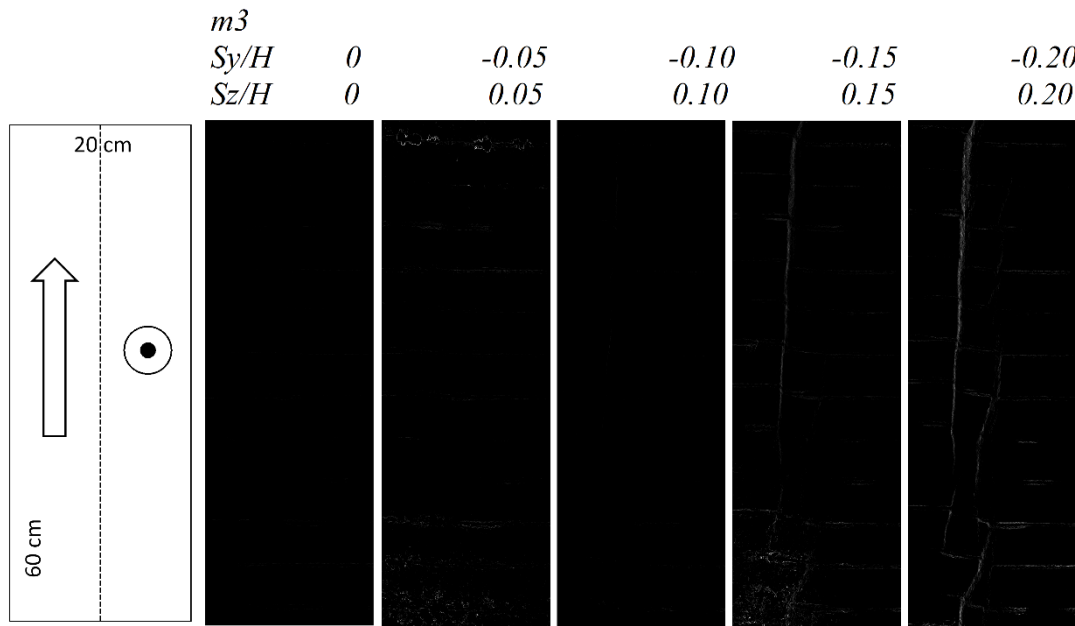
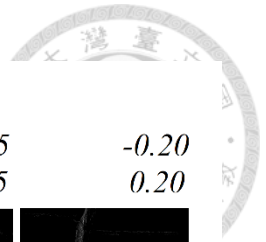
A-20 斜向滑移(m3)等高線圖



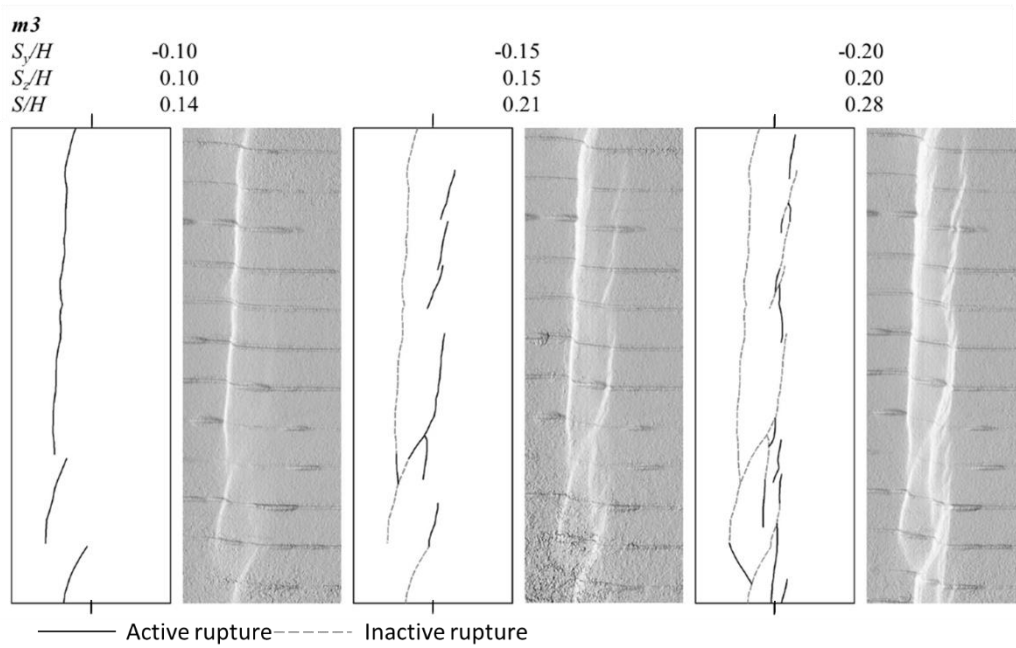
A-21 斜向滑移(*m3*)坡度圖



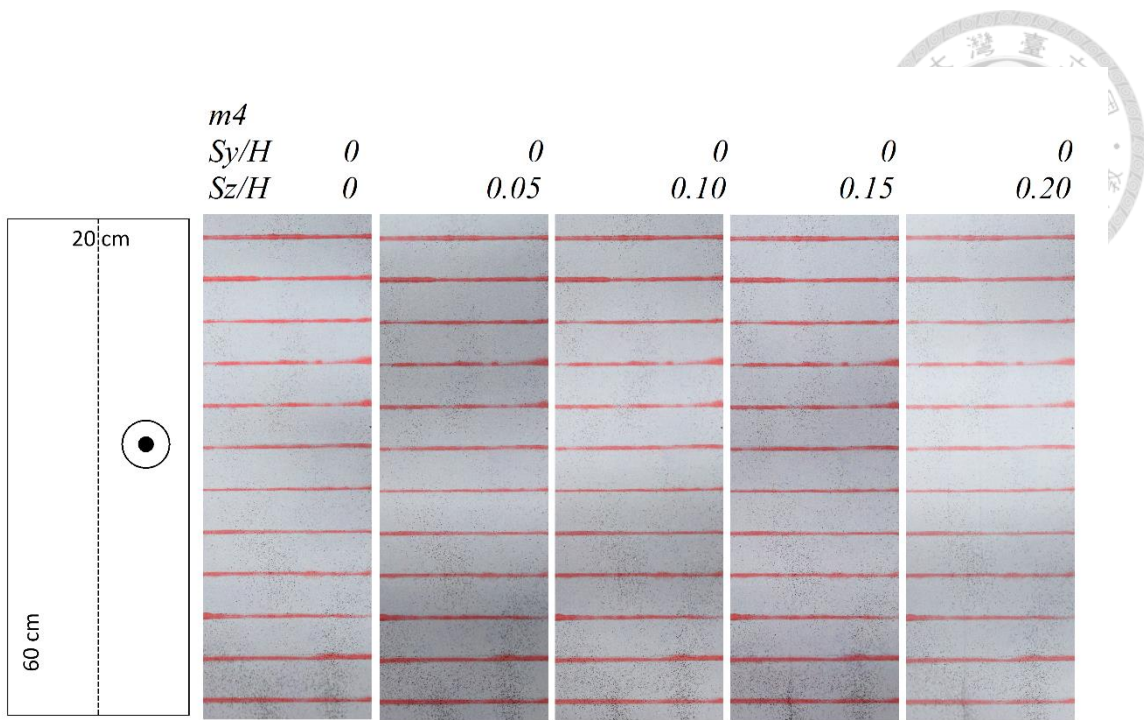
A-22 斜向滑移(*m3*)坡向圖



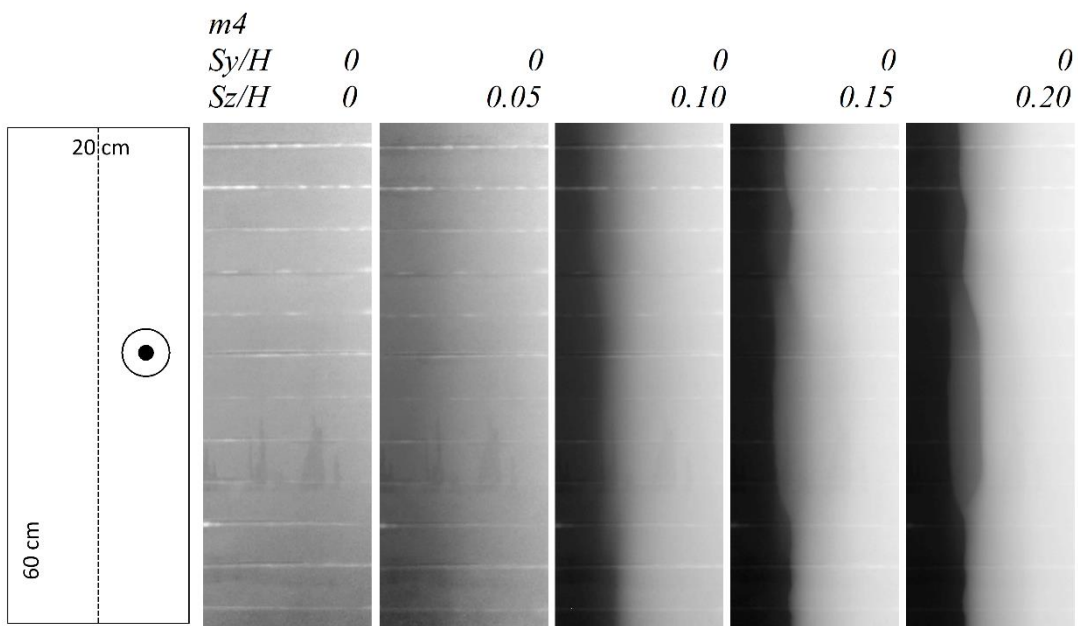
A-23 斜向滑移(m3)粗糙度圖



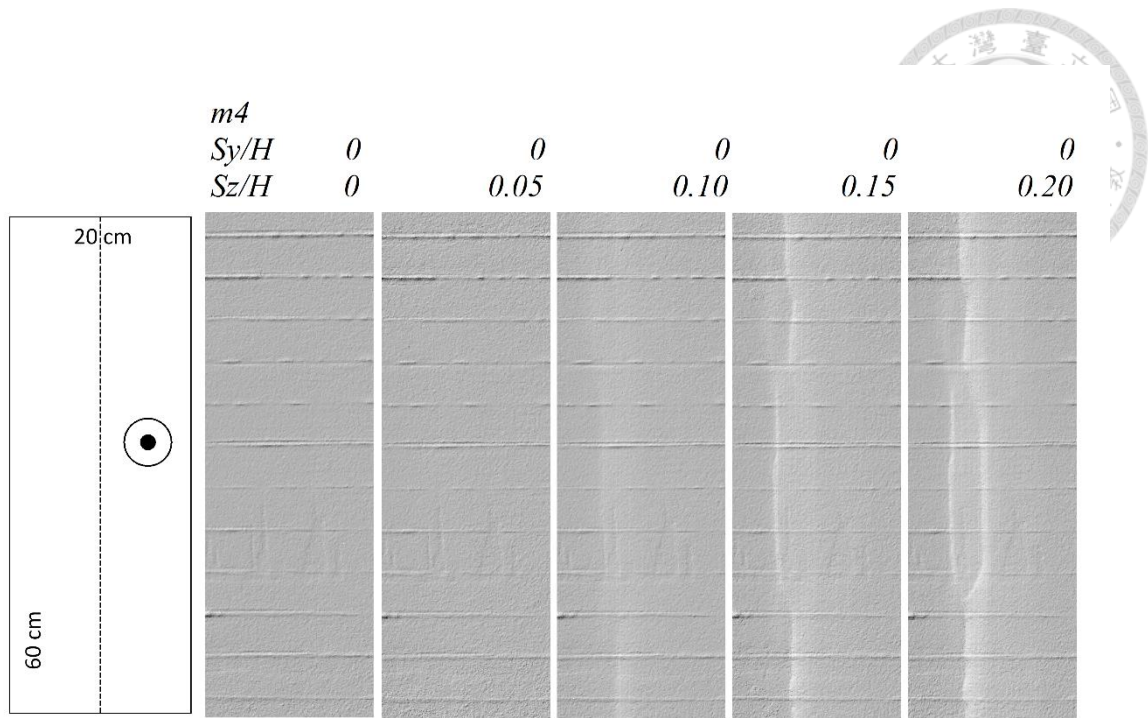
A-24 斜向滑移(m3)地表線形



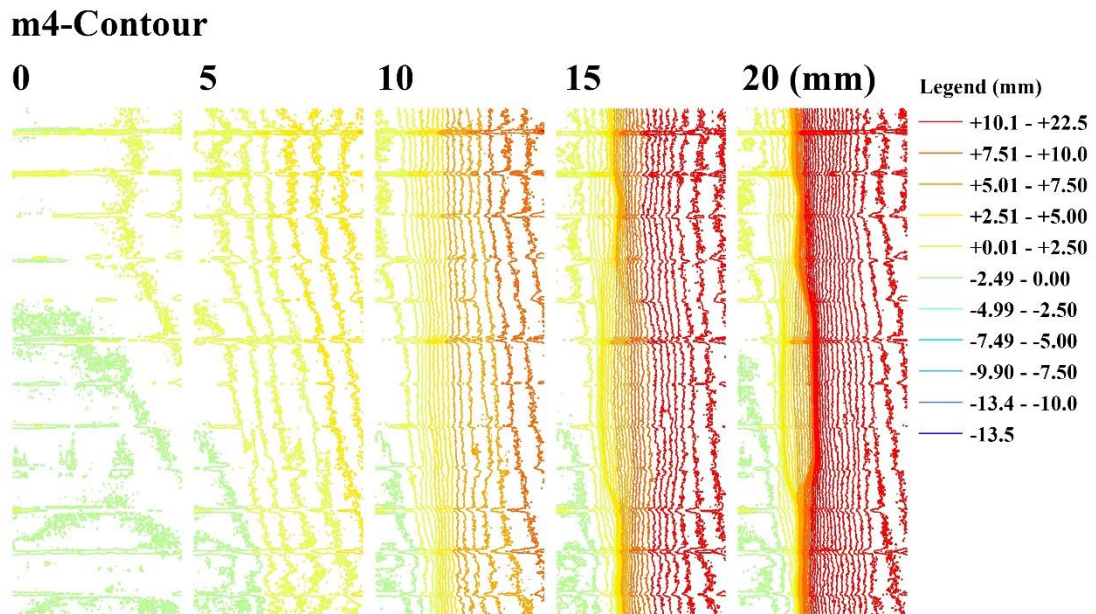
A-25 傾向滑移(*m4*)正射影像圖



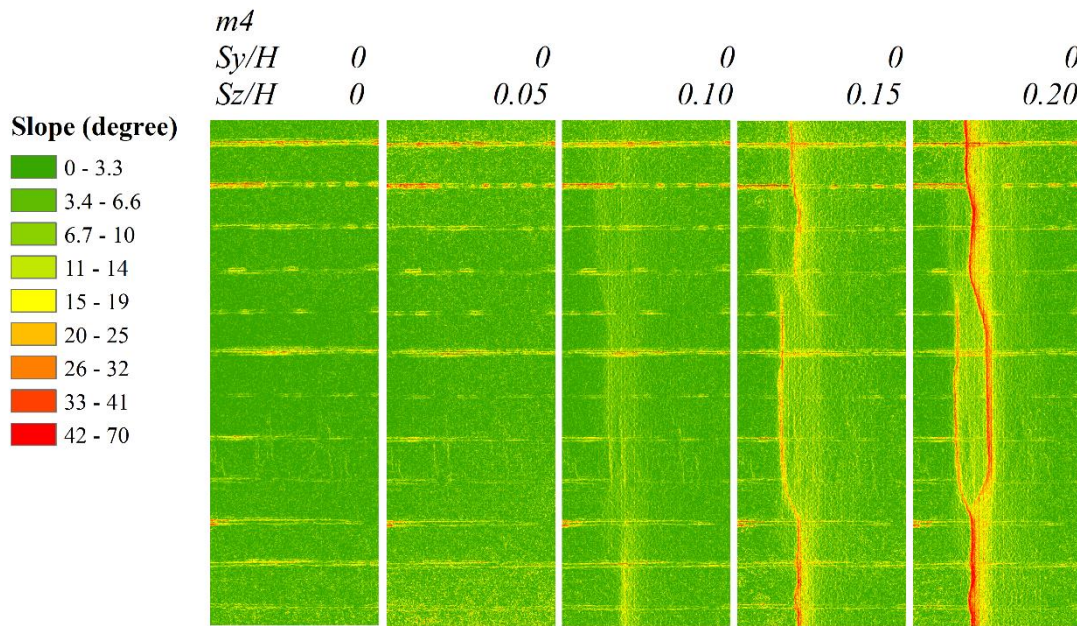
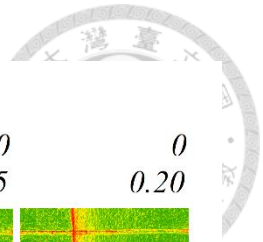
A-26 傾向滑移(*m4*)數值地形高程圖



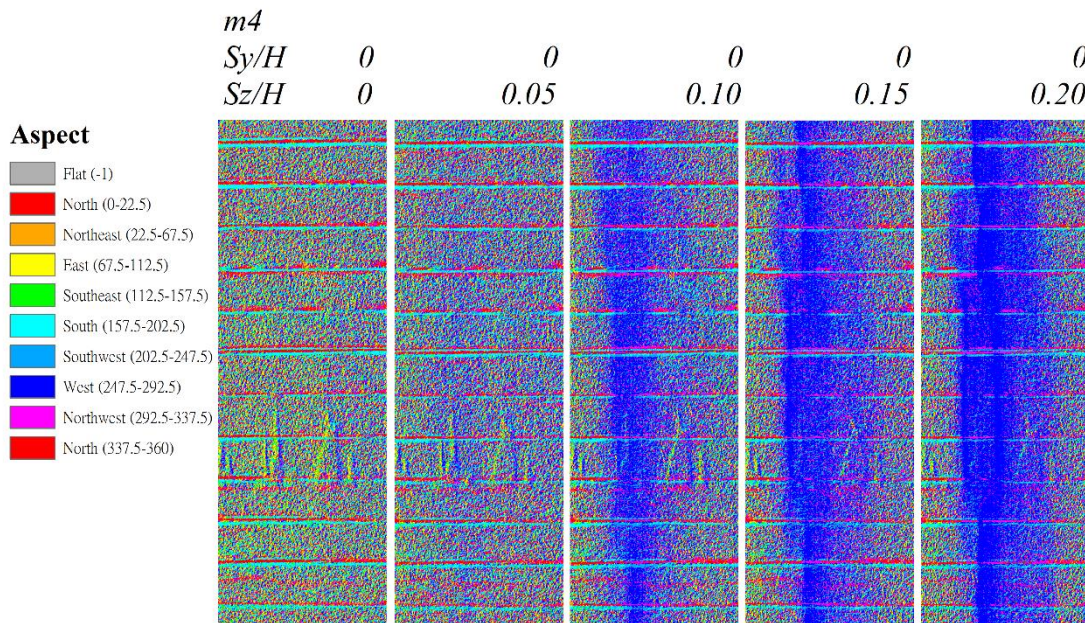
A-27 傾向滑移(m4)日照陰影圖



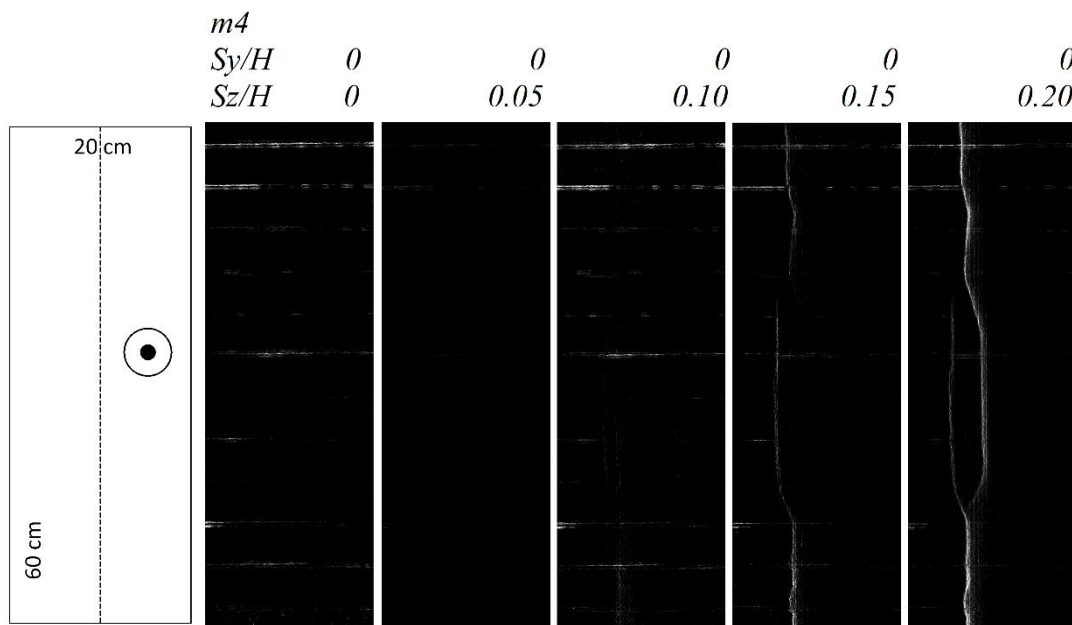
A-28 傾向滑移(m4)等高線圖



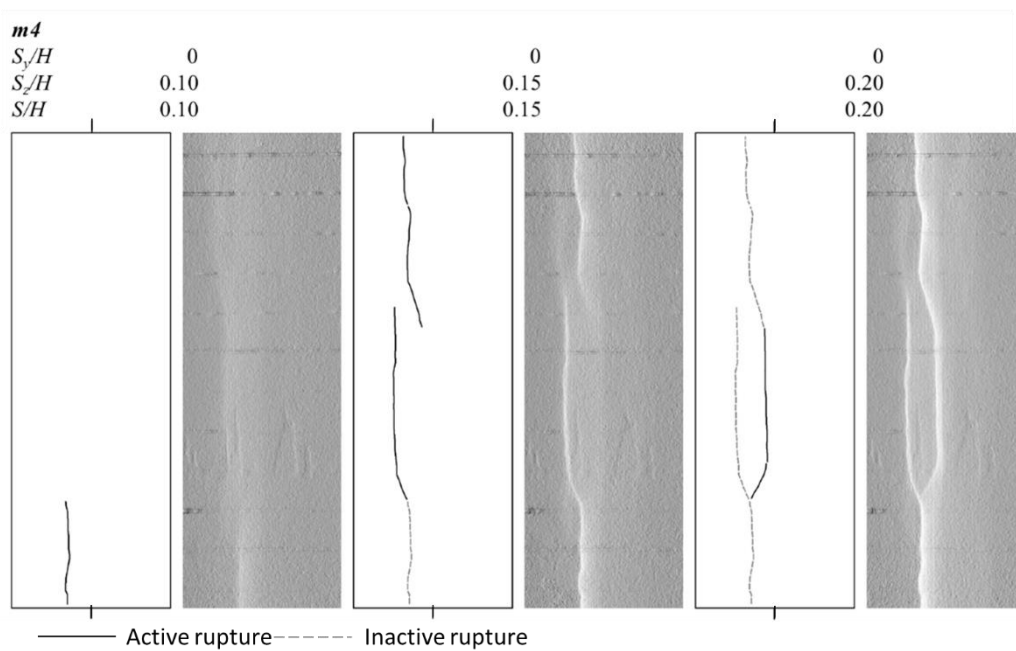
A-29 傾向滑移(m4)坡度圖



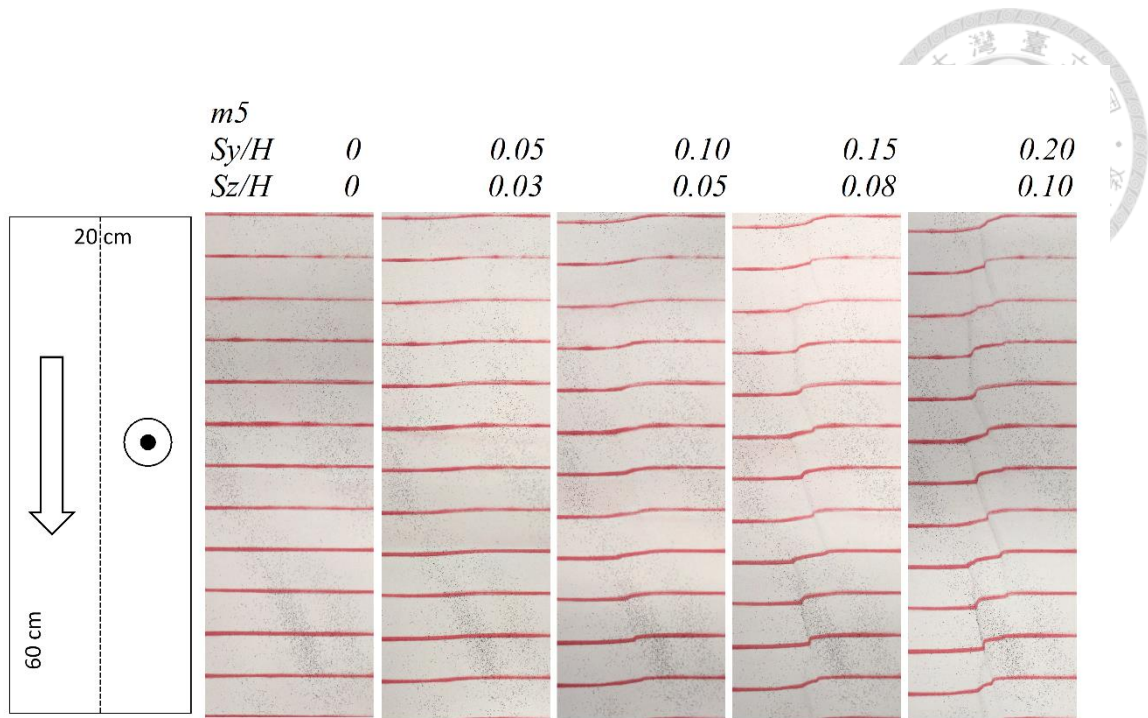
A-30 傾向滑移(m4)坡向圖



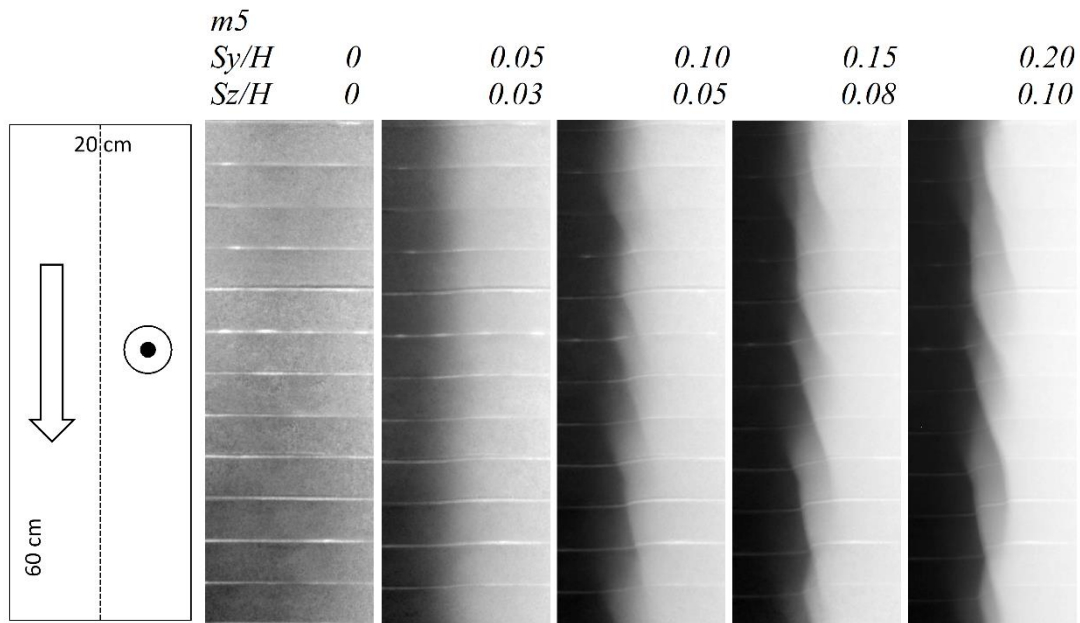
A-31 傾向滑移(m4)粗糙度圖



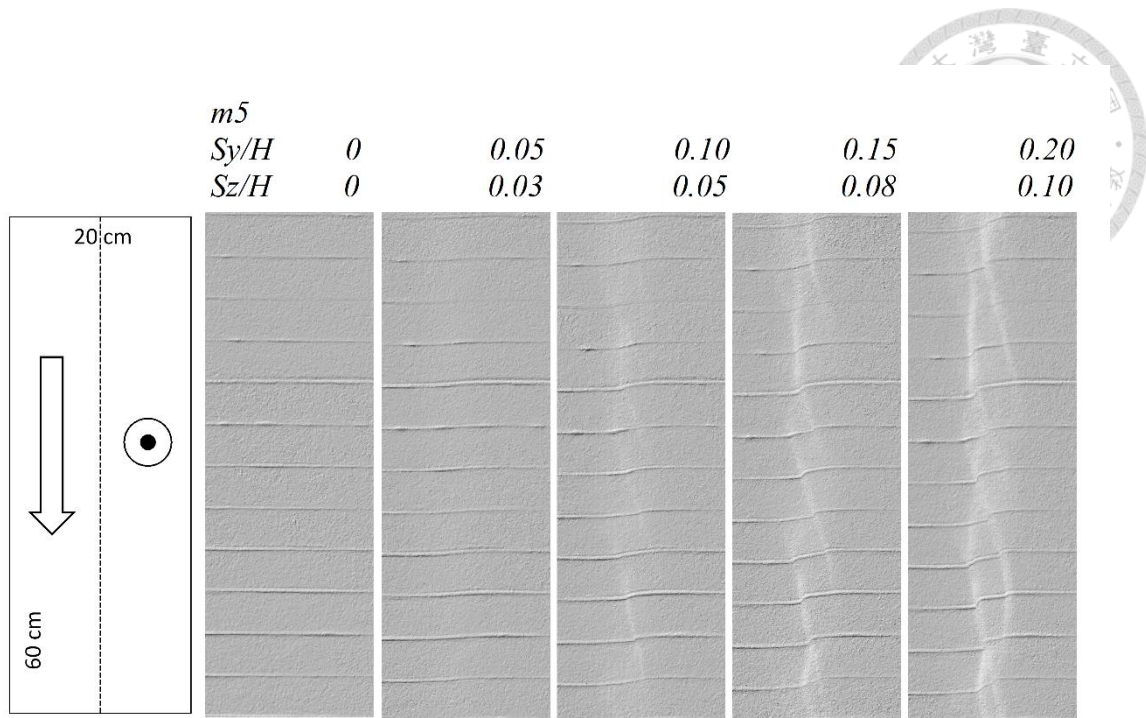
A-32 傾向滑移(m4)地表線形



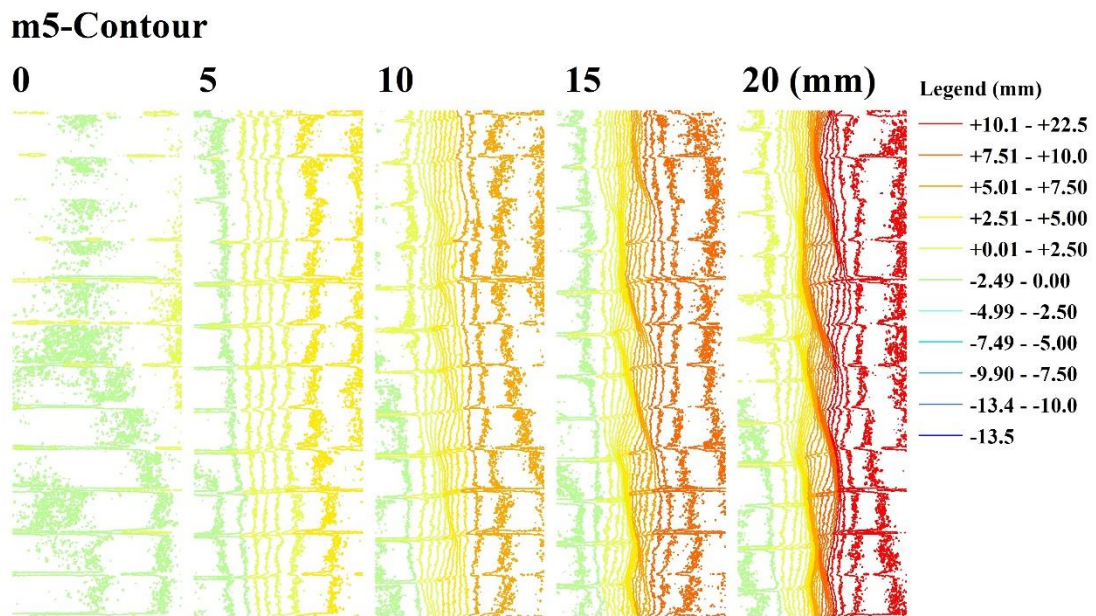
A-33 斜向滑移(m5)正射影像圖



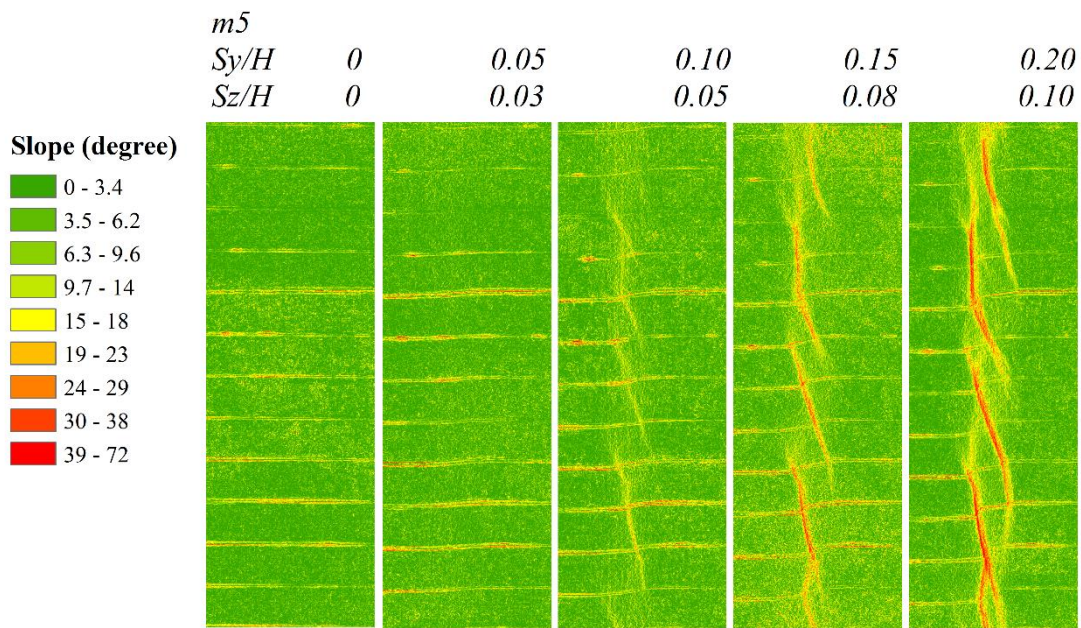
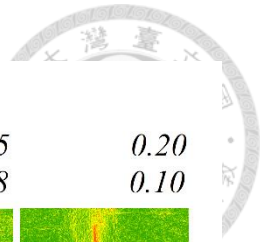
A-34 斜向滑移(m5)數值地形高程圖



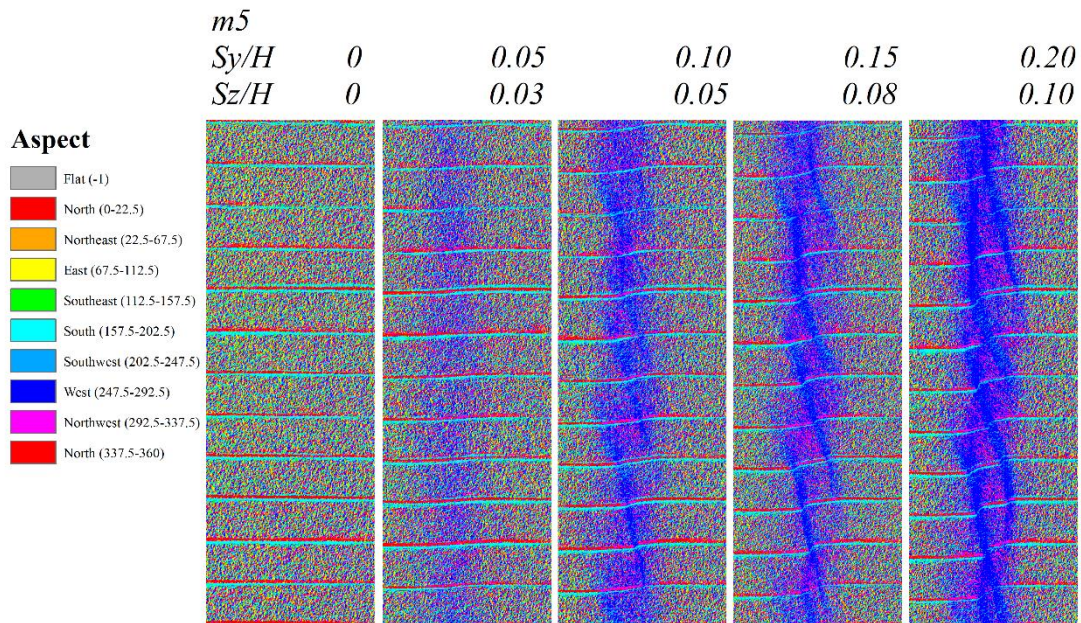
A-35 斜向滑移(m5)日照陰影圖



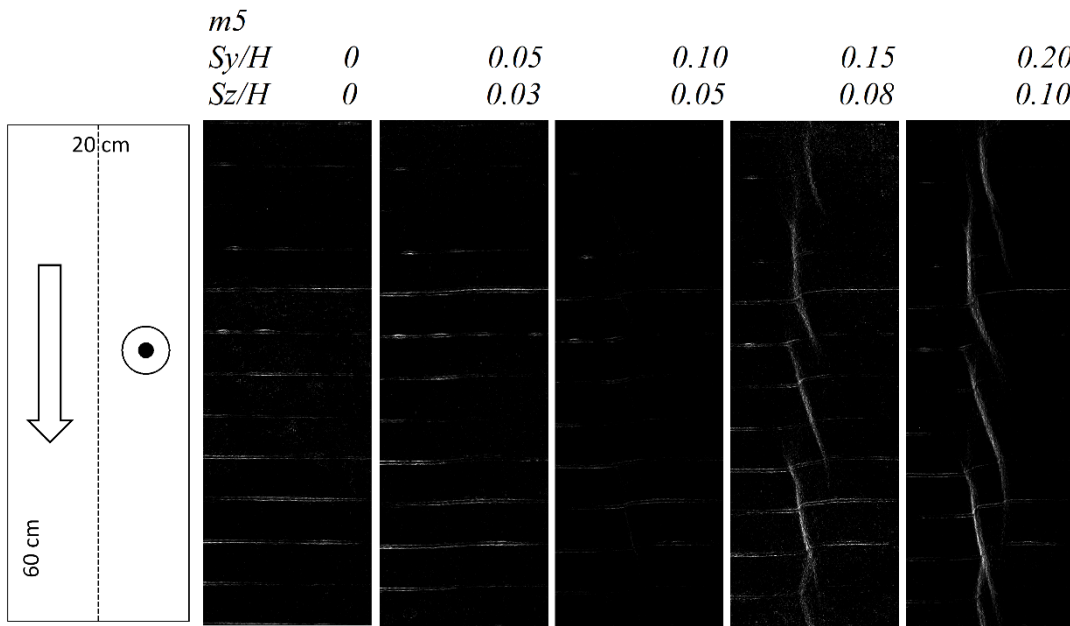
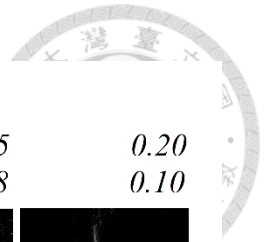
A-36 斜向滑移(m5)等高線圖



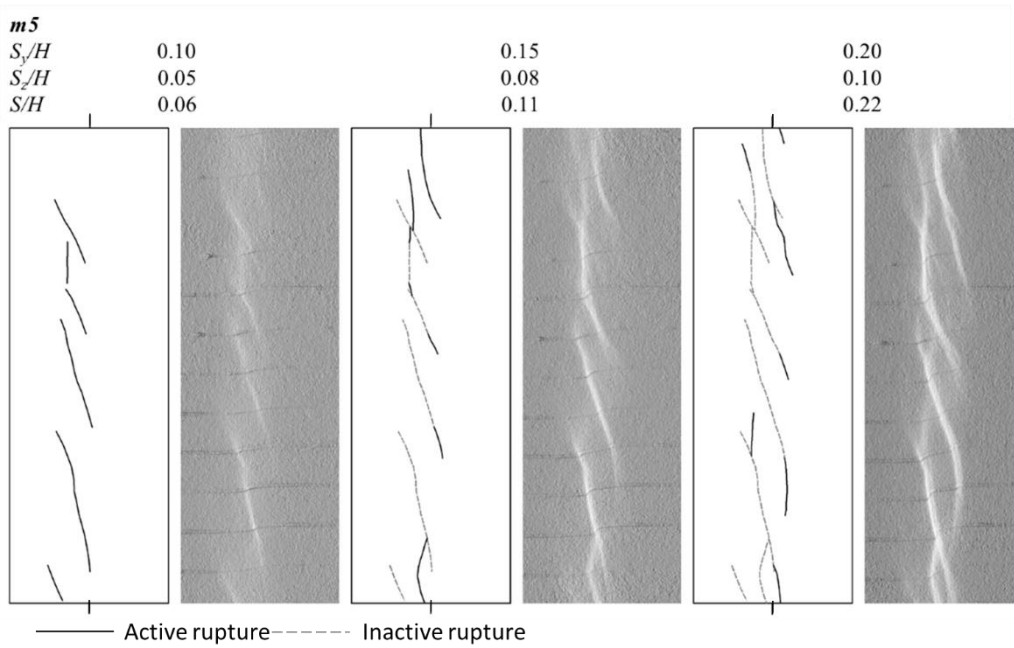
A-37 斜向滑移(m5)坡度圖



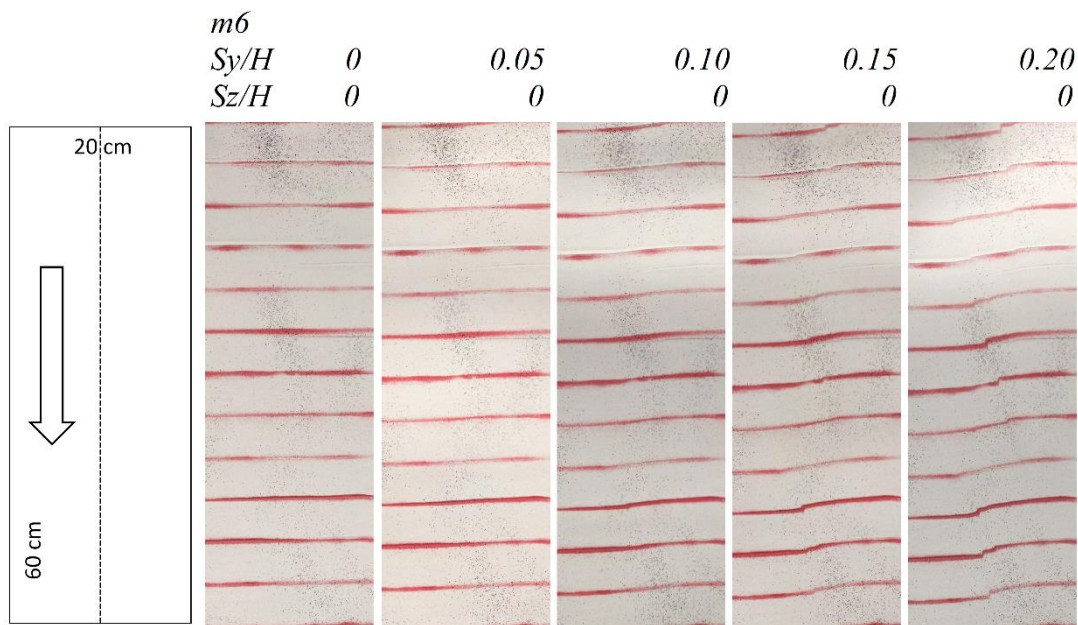
A-38 斜向滑移(m5)坡向圖



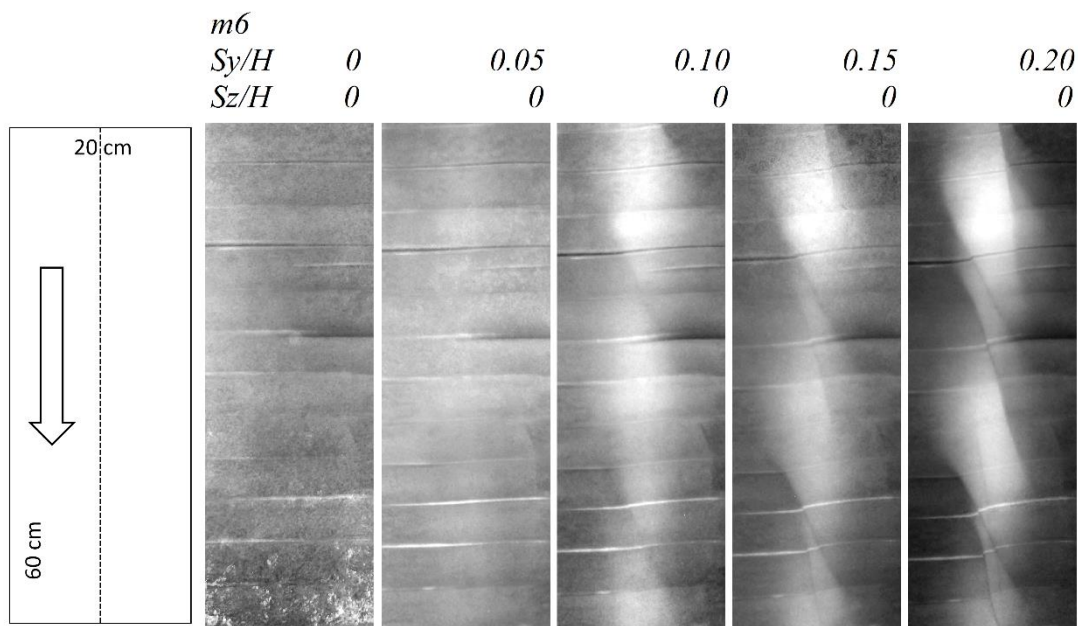
A-39 斜向滑移(m5)粗糙度圖



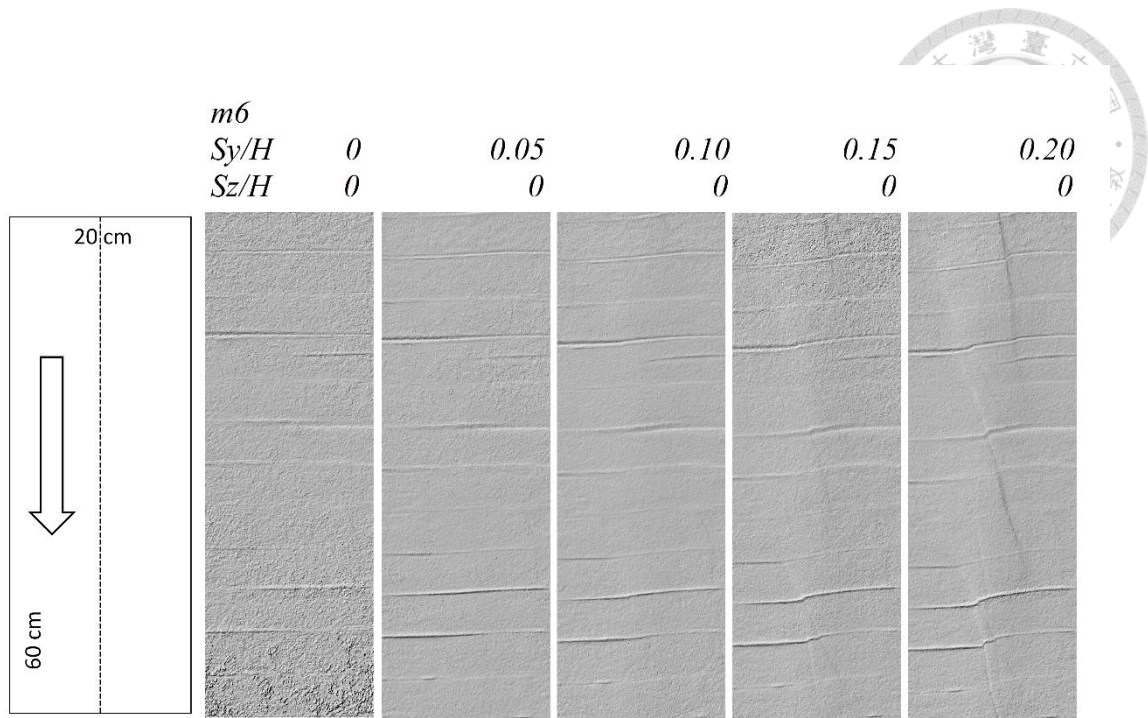
A-40 斜向滑移(m5)地表線形



A-41 走向滑移(m6)正射影像圖

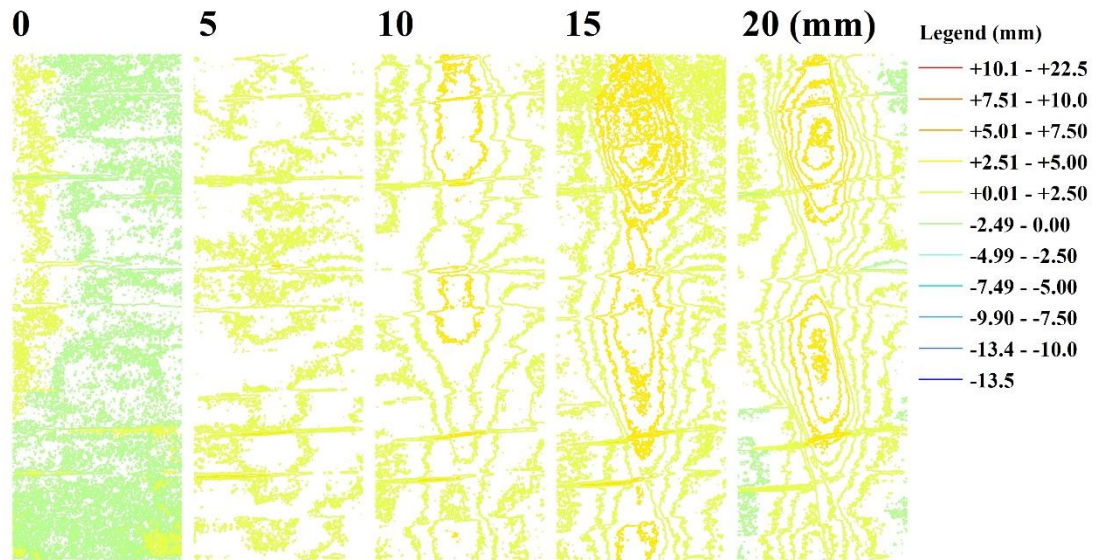


A-42 走向滑移(m6)數值地形高程圖

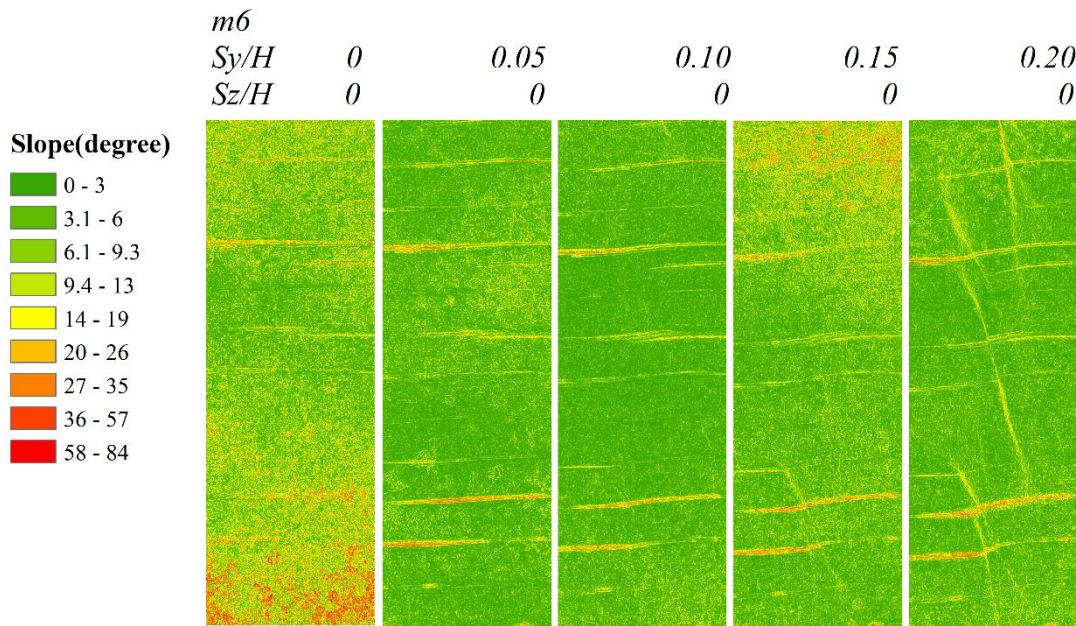
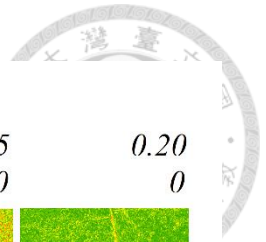


A-43 走向滑移(m6)日照陰影圖

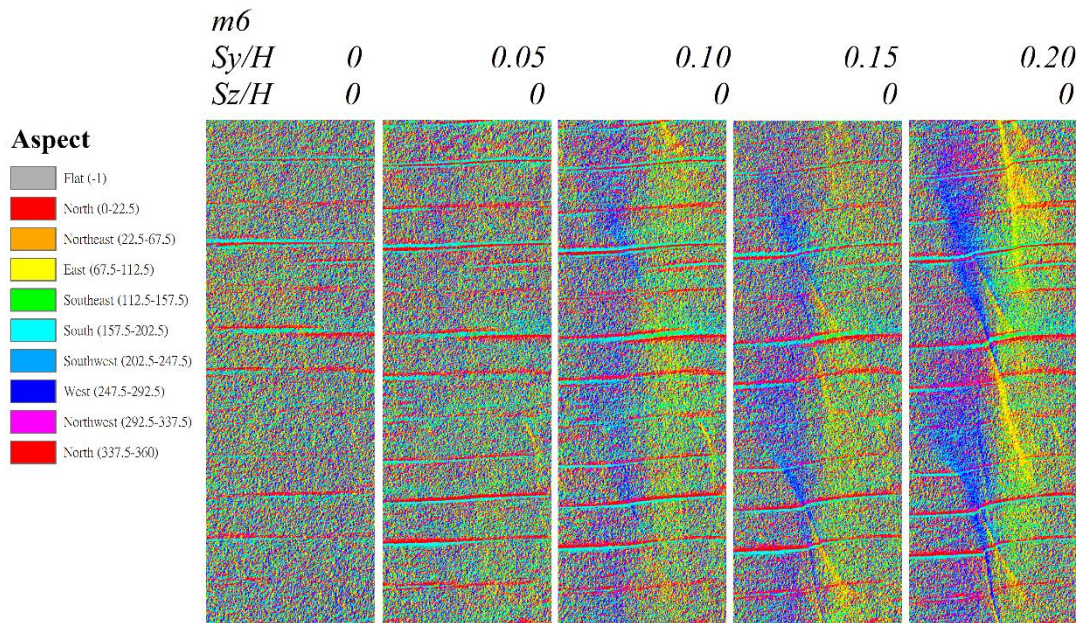
m6-Contour



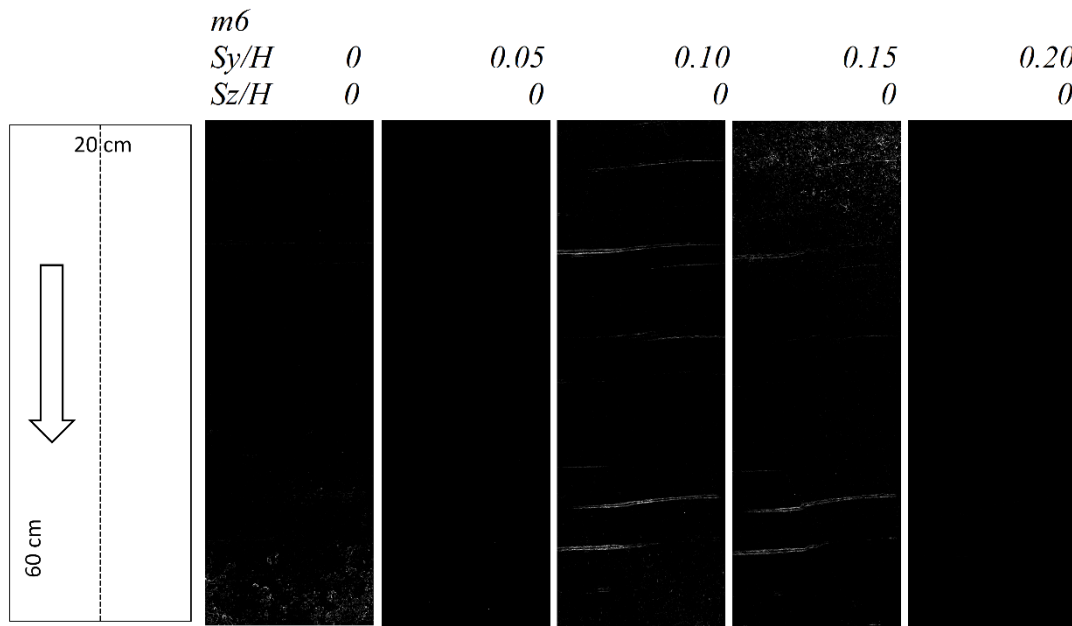
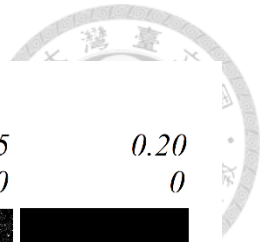
A-44 走向滑移(m6)等高線圖



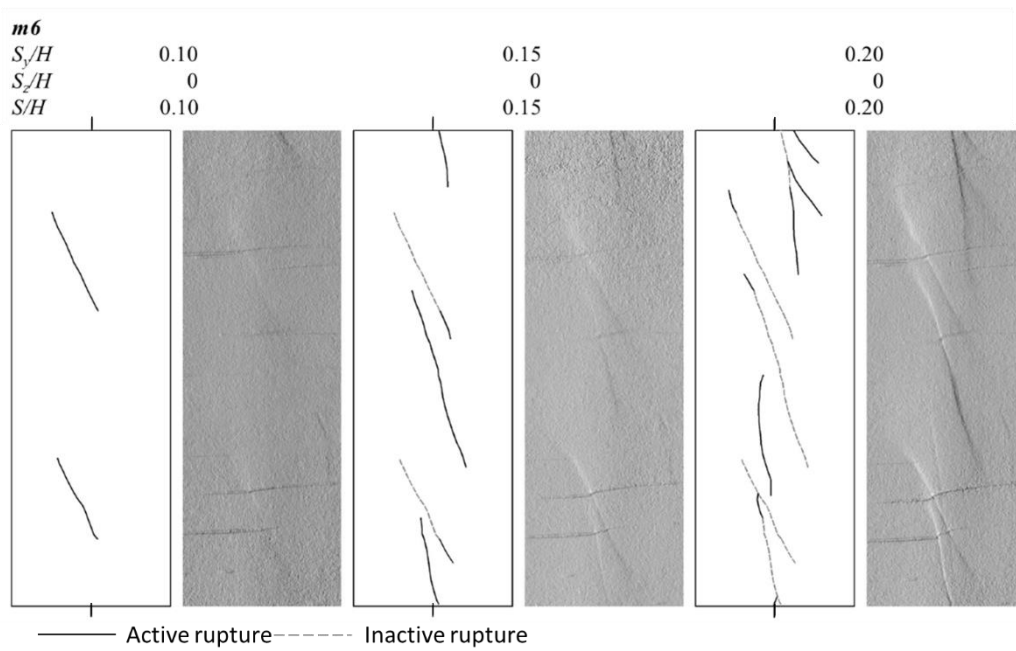
A-45 走向滑移(m6)坡度圖



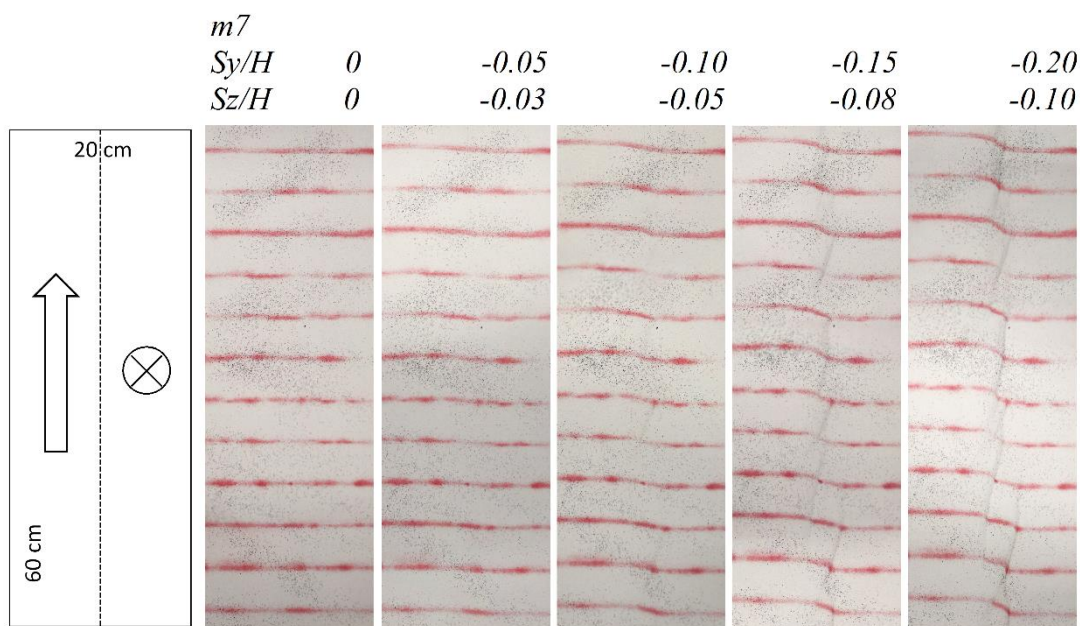
A-46 走向滑移(m6)坡向圖



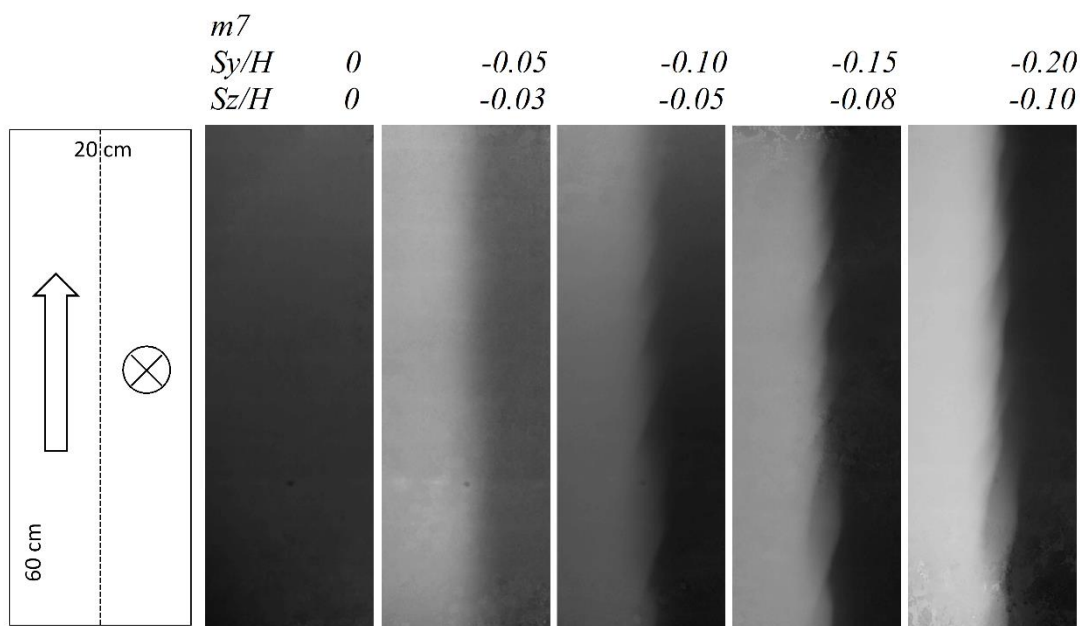
A-47 走向滑移(m6)粗糙度圖



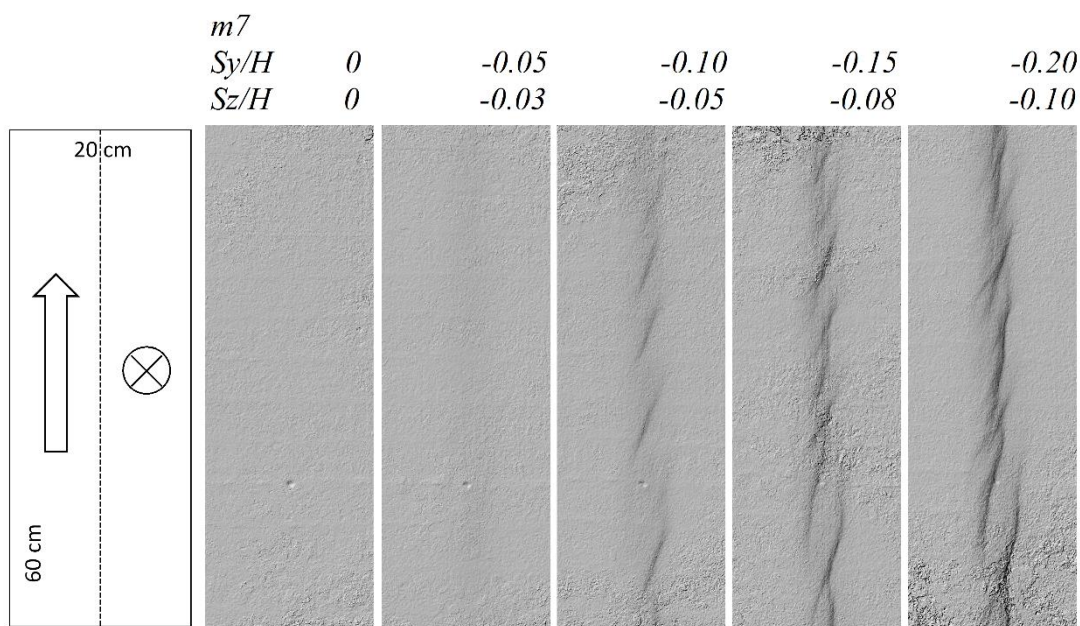
A-48 走向滑移(m6)地表線形



A-49 斜向滑移(m7)正射影像圖

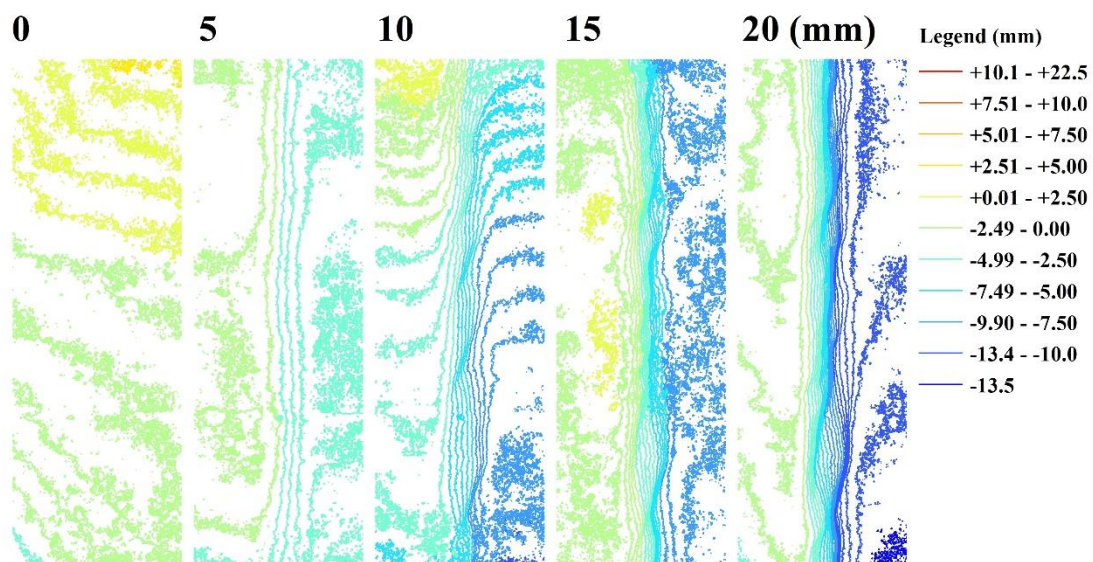


A-50 斜向滑移(m7)數值地形高程圖

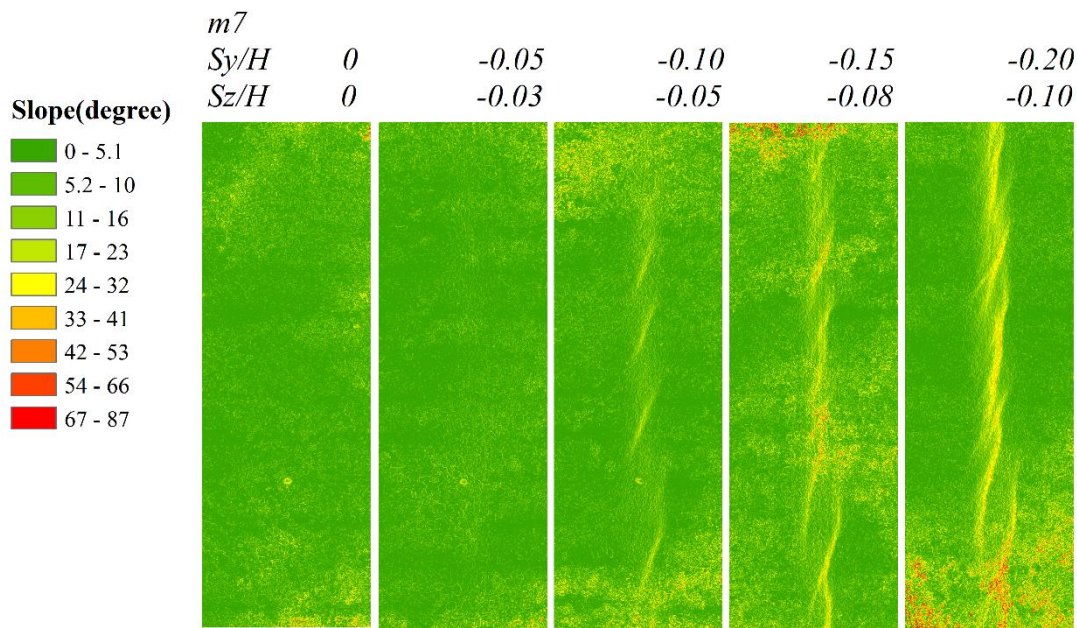
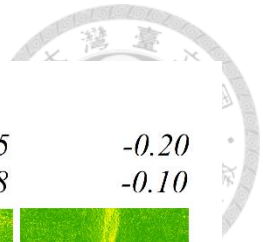


A-51 斜向滑移(m7)日照陰影圖

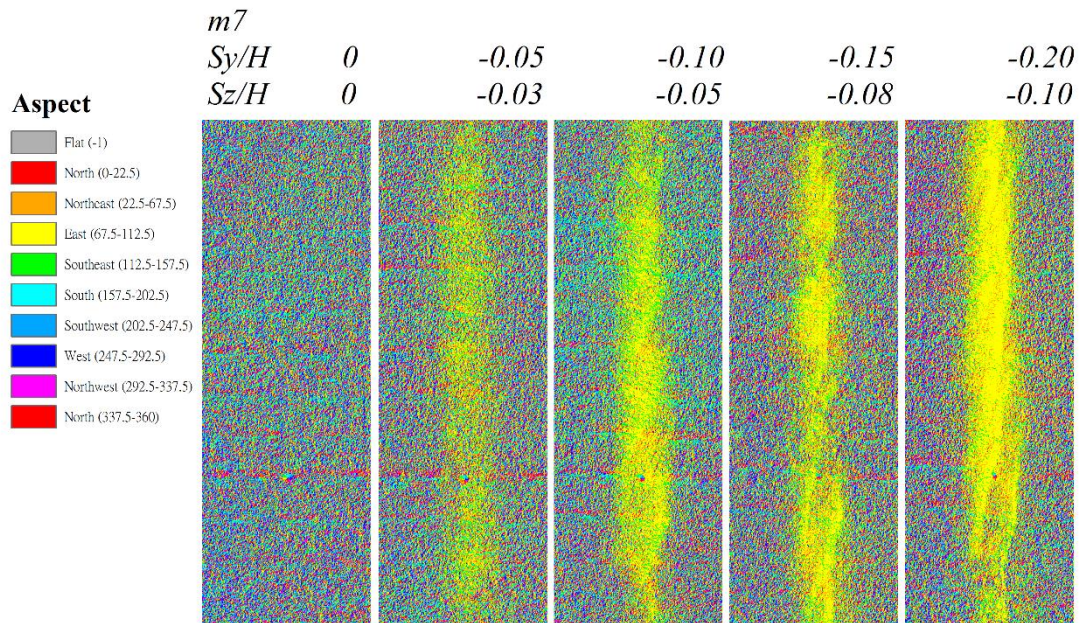
m7-Contour



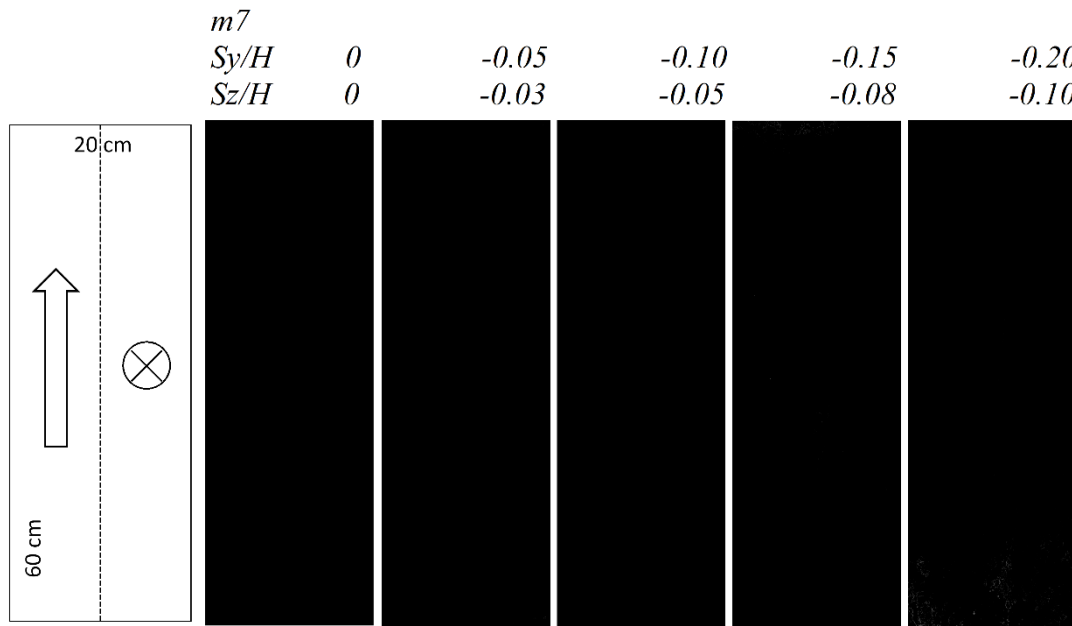
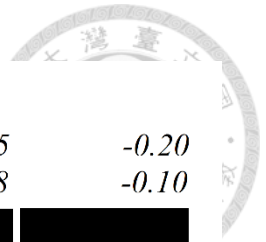
A-52 斜向滑移(m7)等高線圖



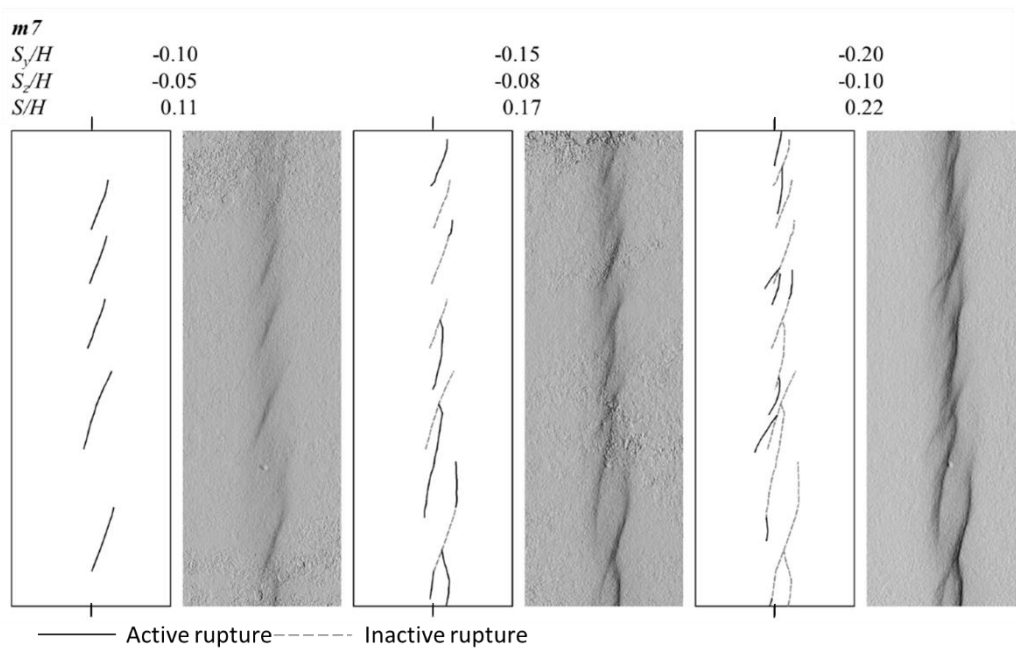
A-53 斜向滑移(m7)坡度圖



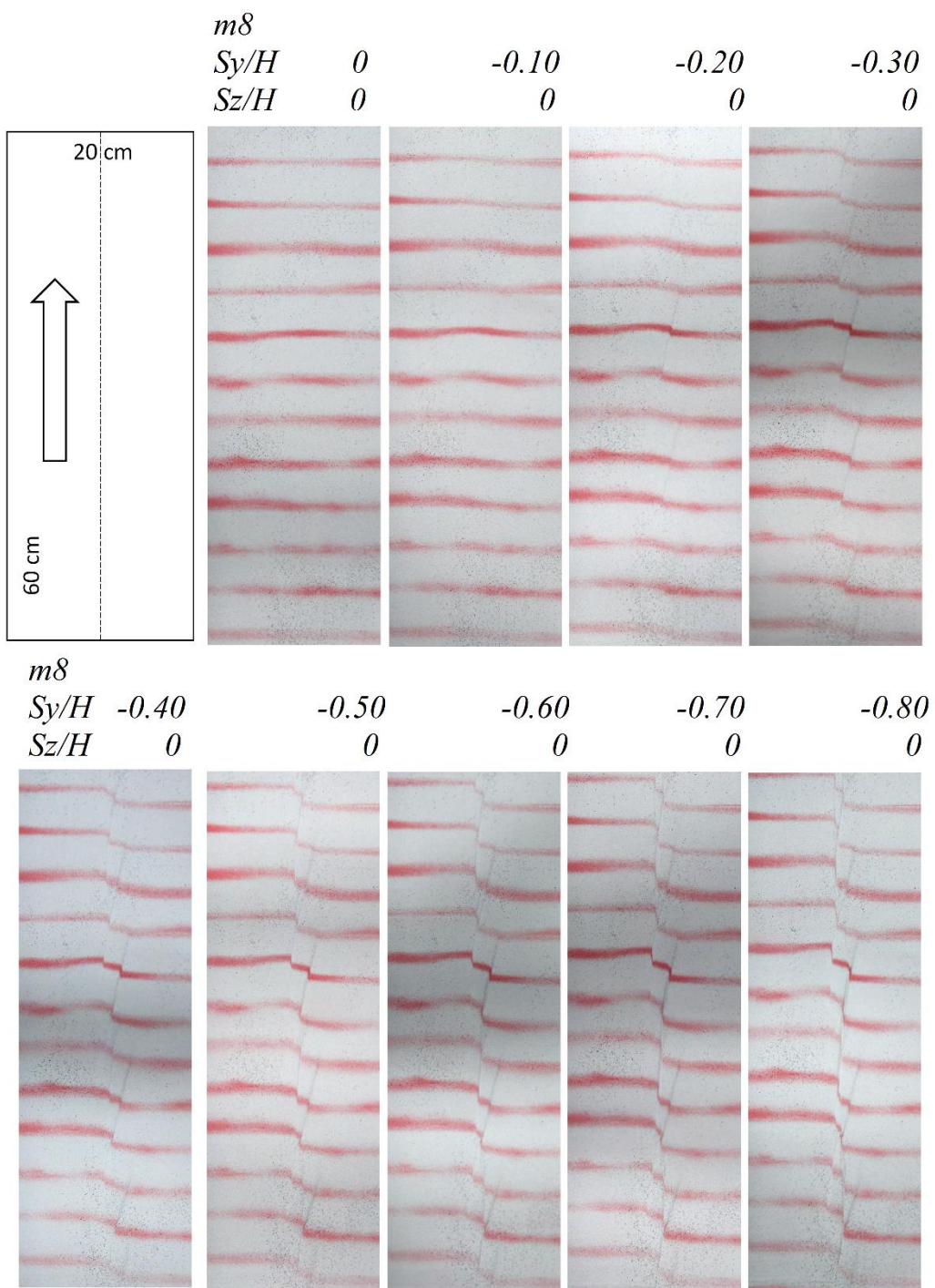
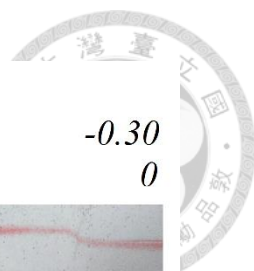
A-54 斜向滑移(m7)坡向圖



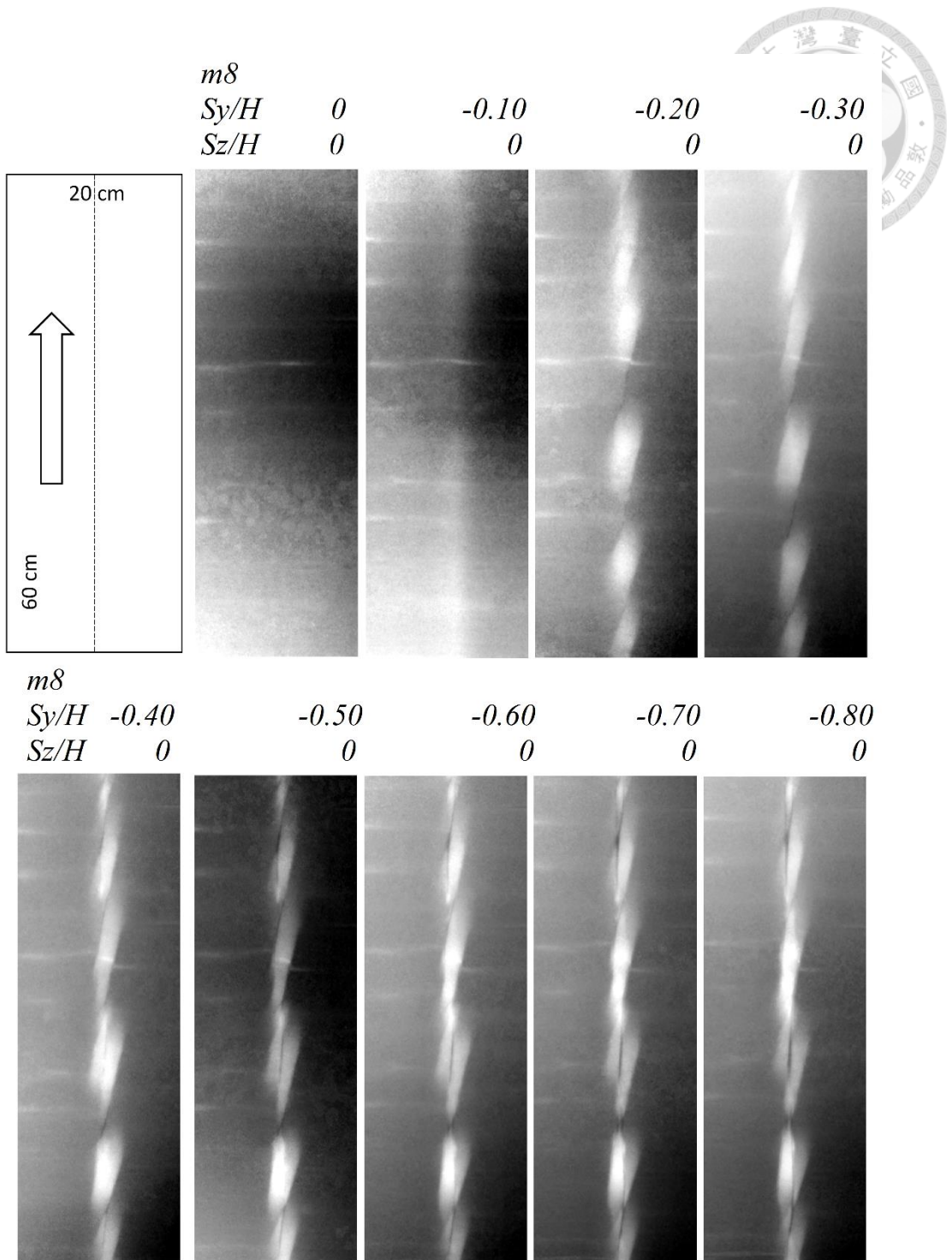
A-55 斜向滑移(m7)粗糙度圖



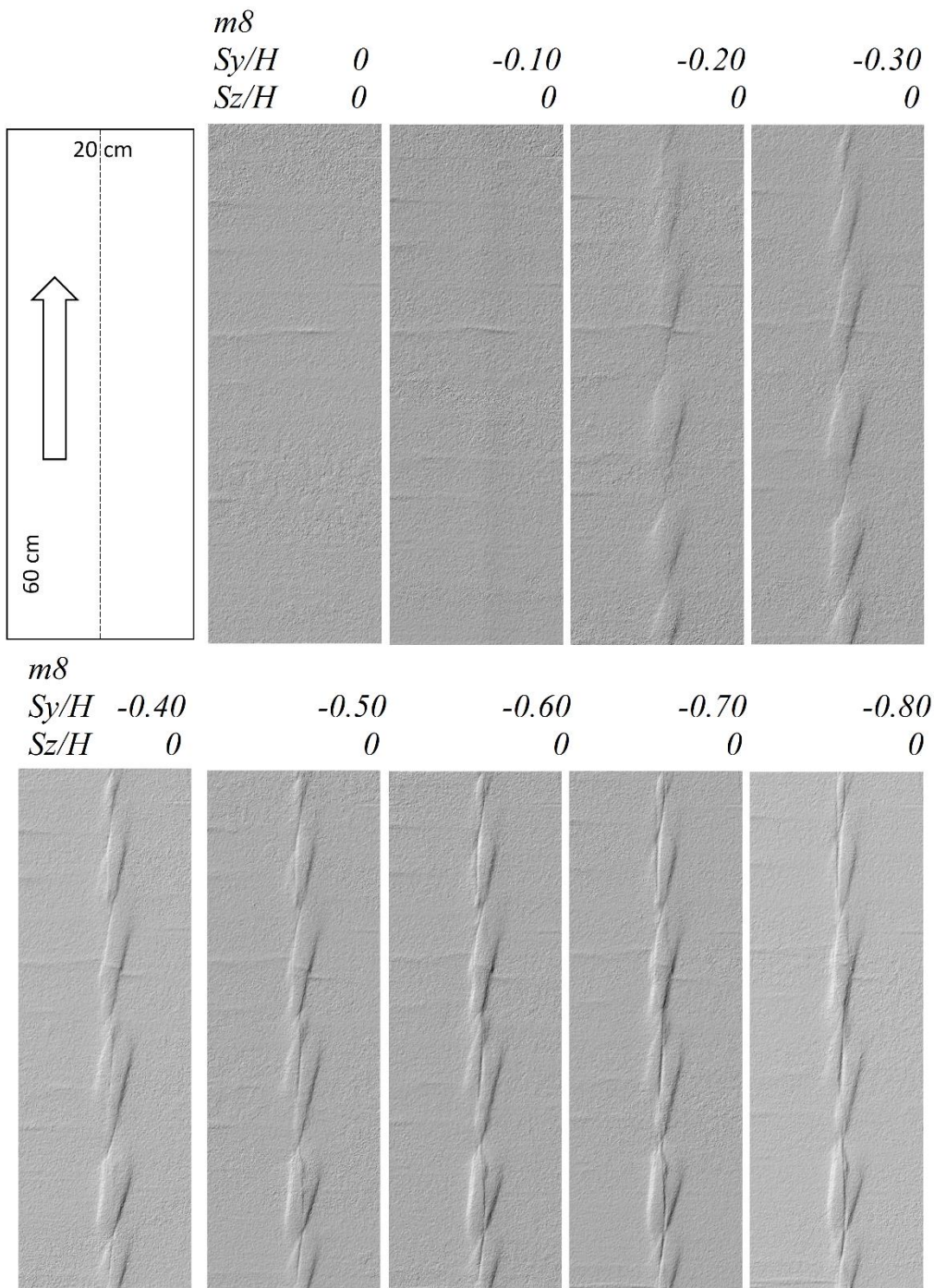
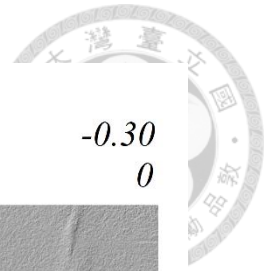
A-56 斜向滑移(m7)地表線形



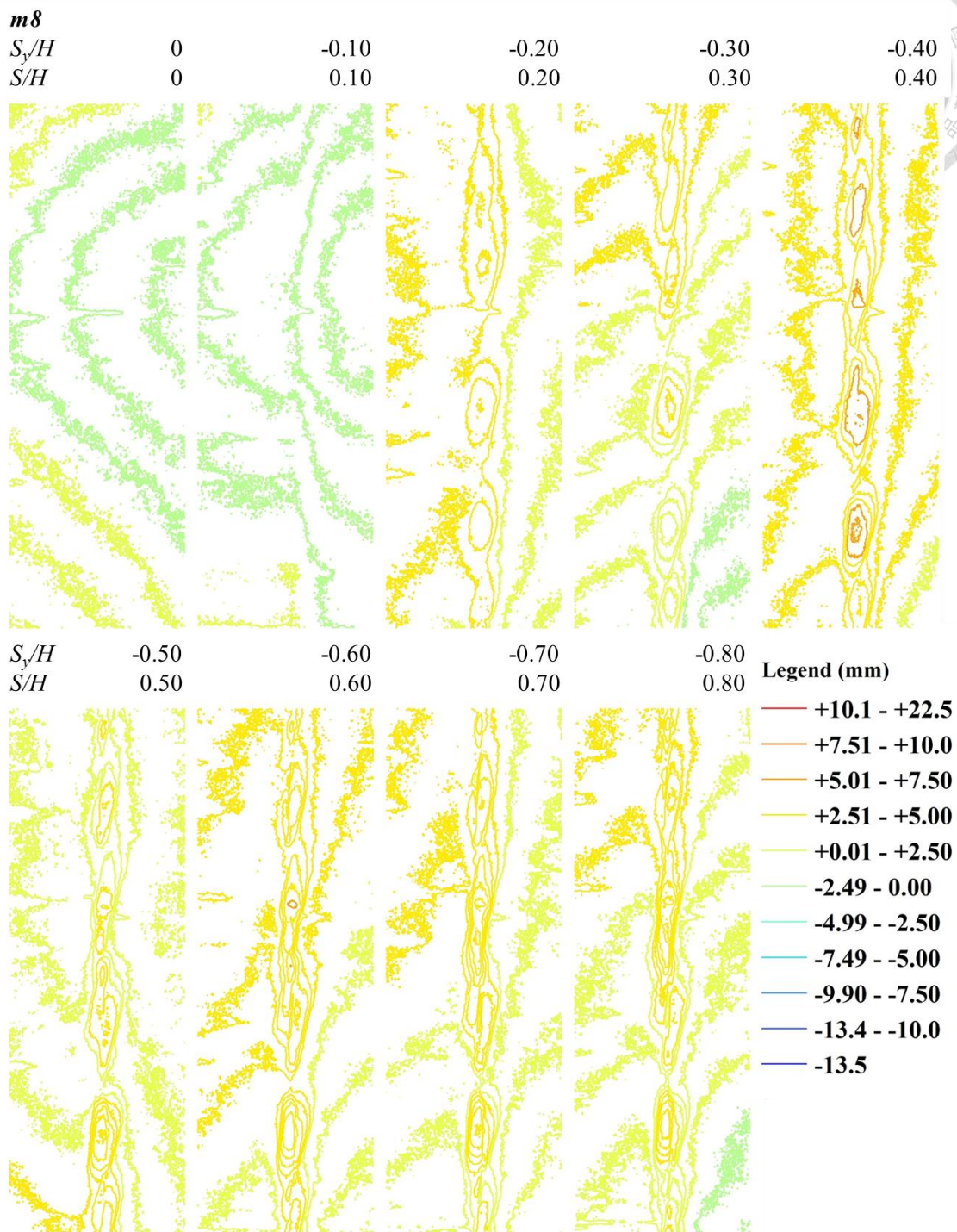
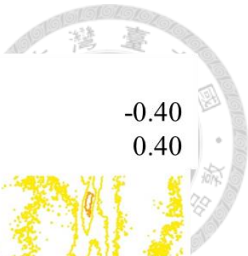
A-57 走向滑移(m8)正射影像圖



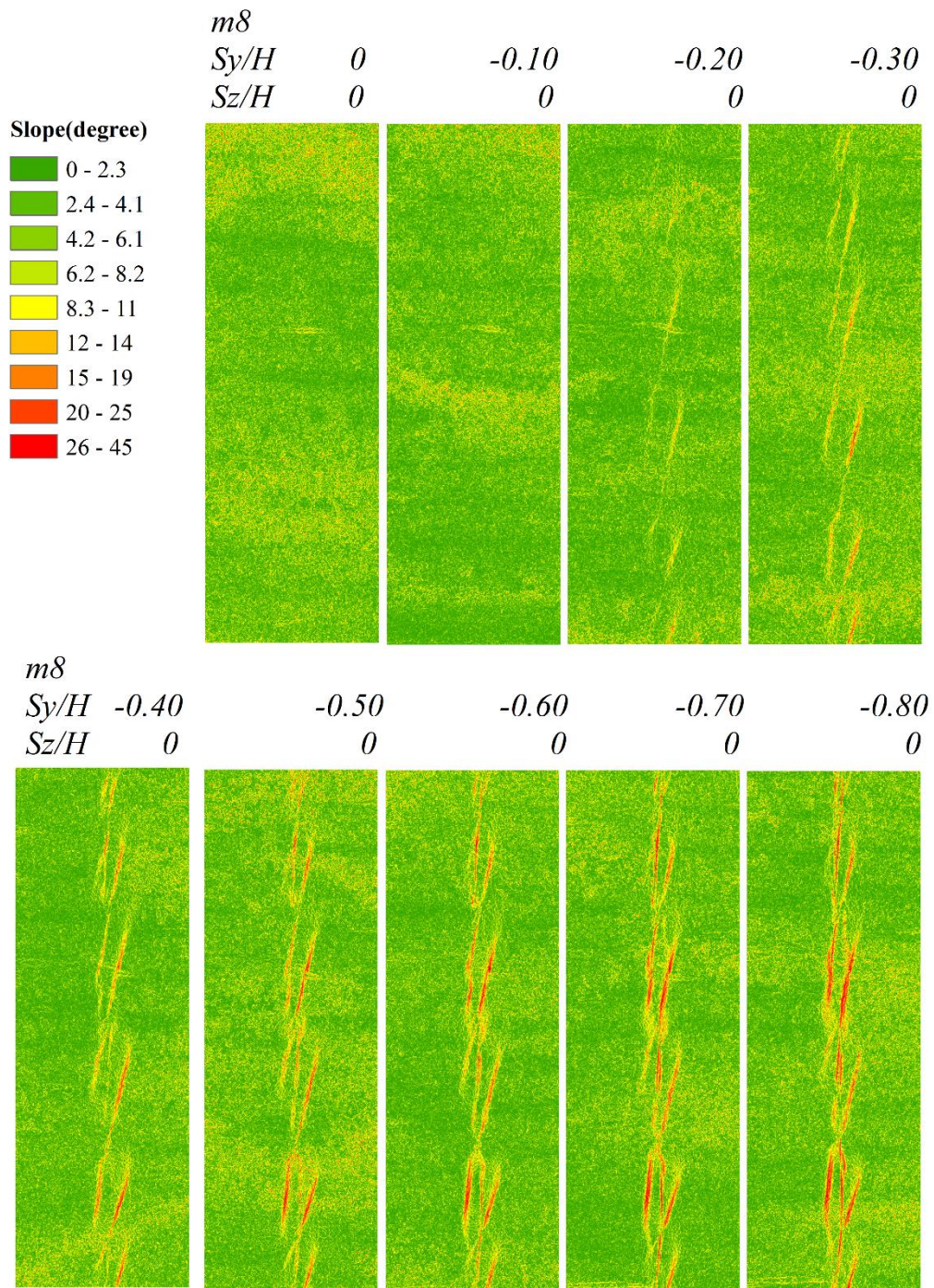
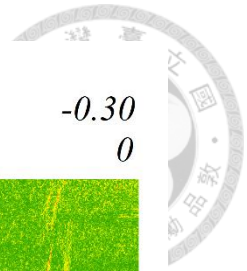
A-58 走向滑移(m8)数值地形高程图



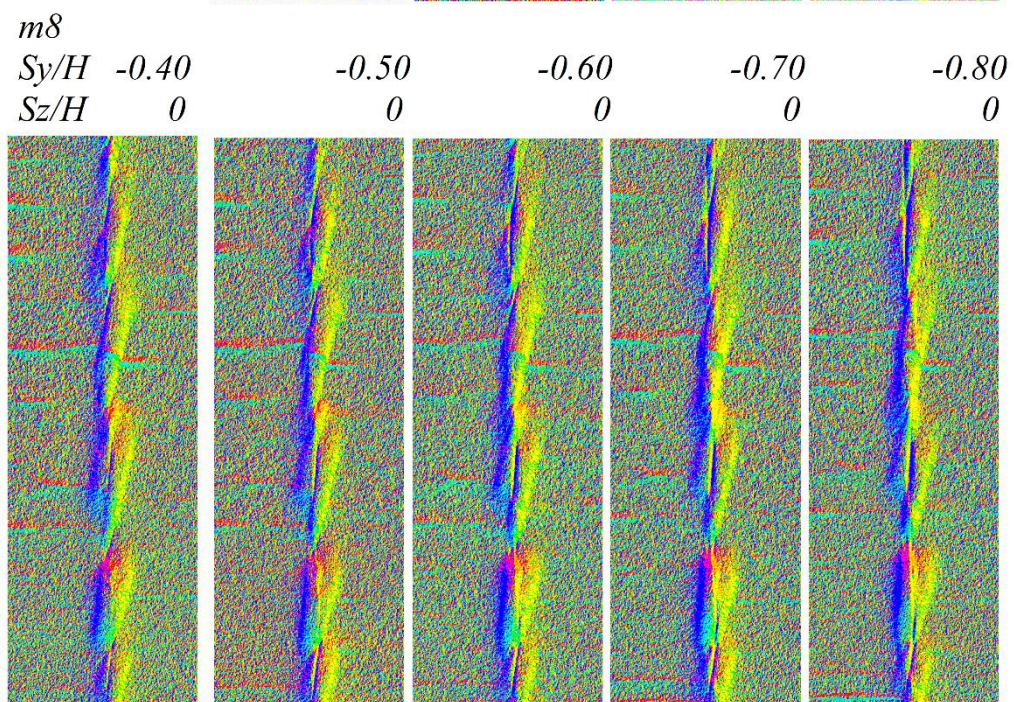
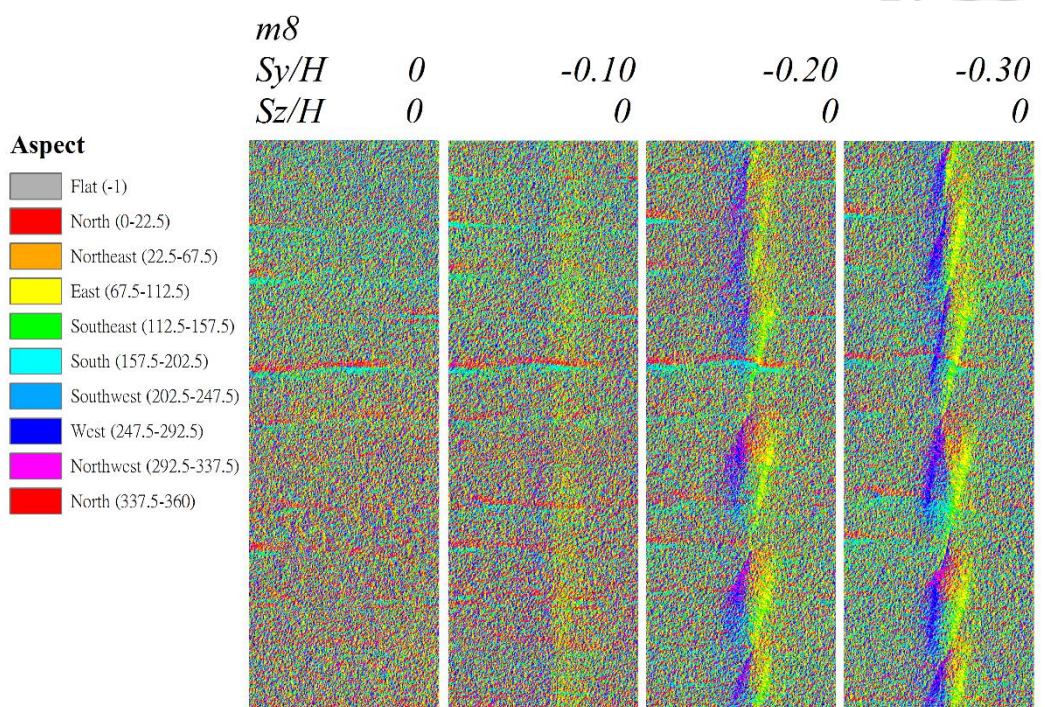
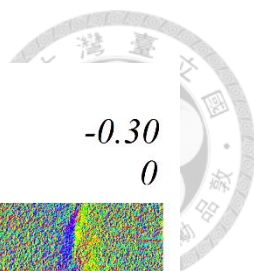
A-59 走向滑移($m8$)日照陰影圖



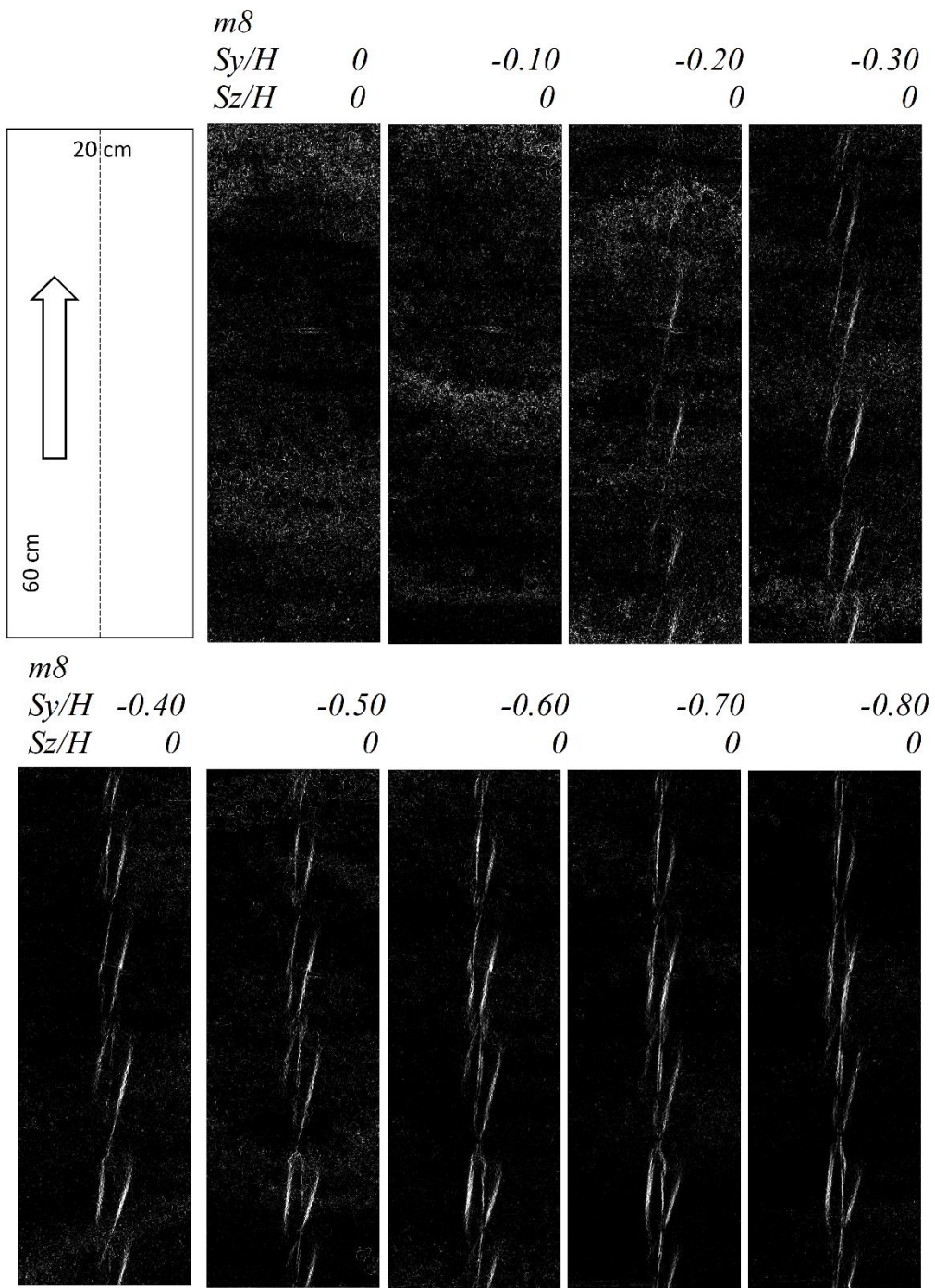
A-60 走向滑移(m8)等高線圖



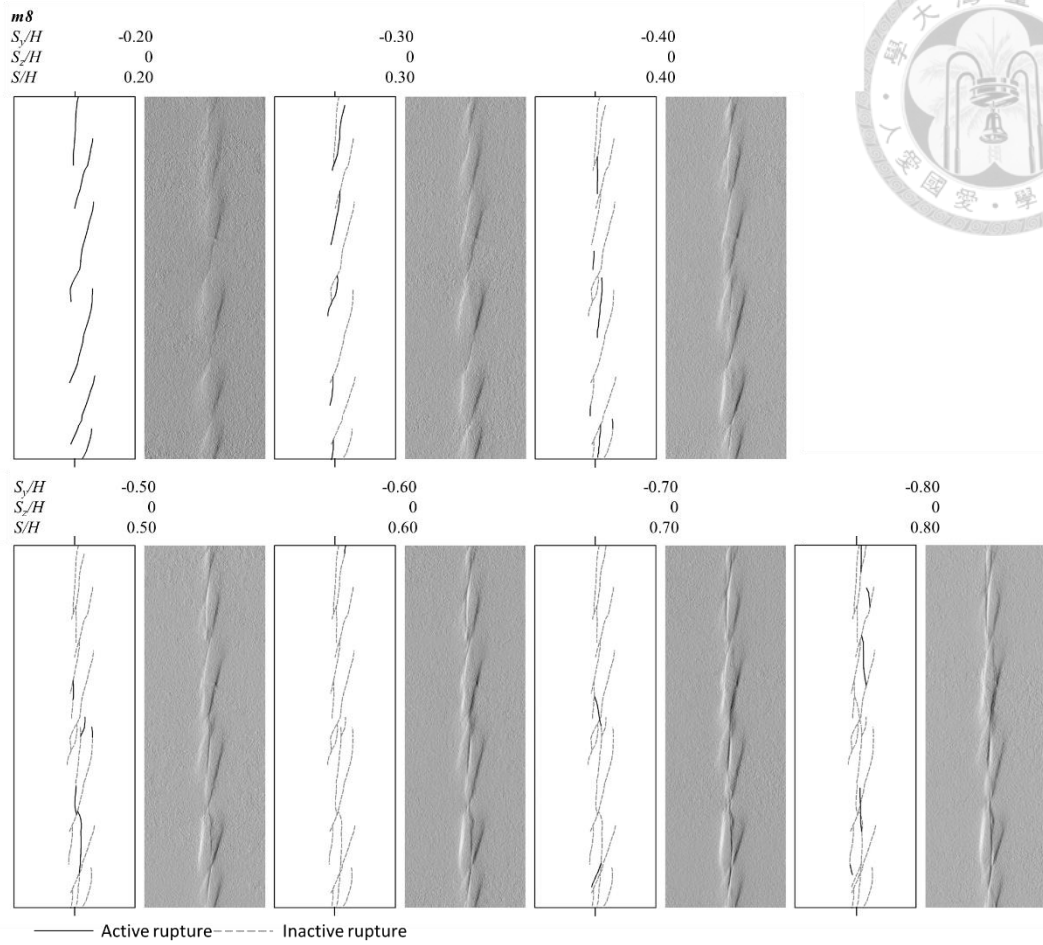
A-61 走向滑移(m8)坡度圖



A-62 走向滑移(m8)坡向圖



A-63 走向滑移(m8)粗糙度圖



A-64 走向滑移(m8)地表線形

The image shows the A-65 PIV software interface with the following panels and settings:

- Exclusions (CTRL+E):** Region of interest (ROI) active. ROI coordinates: x: 528, y: 270, width: 869, height: 516.
- PIV settings (CTRL+S):**
 - PIV algorithm: FFT window deformation (selected).
 - Pass 1: Interrogation area [px] = 160, Step [px] = 80, = 50%.
 - Pass 2...4:
 - Pass 2: Interrogation area [px] = 80, Step [px] = 40.
 - Pass 3: Interrogation area [px] = 16, Step [px] = 8.
 - Pass 4: Interrogation area [px] = 16, Step [px] = 8.
 - Window deformation interpolator: *linear.
 - Sub-pixel estimator: Gauss 2x3-point.
- Calibration (CTRL+Z):** (applies to all frames)
 - Load calibration image (opt.)
 - Select reference distance
 - Real distance [mm] = 500
 - time step [ms] = 10000
 - Clear calibration
 - 1 px = 0.00258 m
 - 1 px/frame = 0.00028 m/s
 - Apply calibration
- Vector validation (CTRL+V):**
 - Select velocity limits
 - display all frames in scatterplot (unchecked)
 - Limit inactive
 - Clear limits
 - Stdev filter (checked): Threshold [n*stdev] = 3
 - Local median filter (checked): Threshold = 5
 - Epsilon = 0.1
 - Manually reject vector
 - Interpolate missing data (checked)
 - Apply to current frame
 - Apply to all frames
 - Undo all validations (all frames)
- Modify plot appearance (CTRL+M):**
 - Vector scale: 8, Autoscale (checked), Vector linewidth = 0.5
 - plot every nth vector, n = 1
 - Vector colors:
 - R G B [0...1]
 - 0 1 0 valid vectors
 - 0 0 0 valid vectors with derivatives
 - 0 1 0 interpol. vectors
 - Derived parameters only:
 - Color map: Lines
 - Display color bar, position: South
 - Apply

A-65 PIV 設定參數