經濟部

經濟部中央地質調查所報告第 9 號
委辦計畫編號（100-5226904000-05-01）

活動斷層近地表變形特性研究(1/4)

委託機關：經濟部中央地質調查所
執行機關：國立臺灣大學
中華民國 100 年 12 月

活動斷層近地表變形特性研究(1/4)

100 年度成果報告

計畫主持人：林銘郎
協同主持人：李崇正
研　究　員：黃文正、黃文昭

委託機關：經濟部中央地質調查所
執行機關：國立臺灣大學
中 華 民 國　１００　年　１２　月

目　錄

頁次

摘要 ..... **III**

ABSTRACT ..... **VI**

圖目錄 ..... **IX**

表目錄 ..... **XIV**

第一章、前言 **1**

1. 計畫背景 **1**

2. 研究目的 **5**

3. 整體構想 **5**

第二章、研究方法 **9**

1.　現地調查 **9**

1-1. 地表變形調查 9

1-2. 地表破裂型態 11

2.　砂箱實驗 **21**

3.　數值分析 **32**

4.　斷層活動對位於上覆土層中人工結構物影響之研究 **32**

5.　研究方法之限制與比較 **36**

第三章、計畫成果 **37**

1. 現地調查 **38**

1-1. 車籠埔斷層 39

1-2. 新城斷層 91

1-3 沉積學與土壤力學對土壤地層描述與分類之比較 107

2. 室內試驗-離心試驗 **115**

2-1. 物理模型試驗 115
2-2. 1 g 模型試驗 115
2-3. 離心模型 116
2-4. 離心模型試驗箱的設計 116
2-5. 試驗用砂 118
2-6. 模型試體床製作 119
2-7. 離心斷層模型試驗相關設備-地工離心機及掛台 120
2-8. 斷層錯動模擬試驗箱的製作及試驗計畫 120
2-9. 斷層錯動模擬試驗的試驗步驟 121
2-10. 斷層錯動 1g 模擬試驗的初步試驗成果 121
2-11. 斷層錯動 10 g 模擬試驗的初步試驗結果 123
2-12. 斷層錯動 1g 及 10 g 模擬試驗的初步結論 124
3. 數值分析 157
3-1. 邊界元素法(BEM) 157
3-2. 有限差分法 176
3-3. 分離元素法程式 184
第四章、研究成果 202
1. 現地調查 202
2. 室內試驗 202
3. 數值分析 203
第五章、參考文獻 204
第六章、審查意見回覆 217
附錄 岩心室內實驗結果報告書 220

摘要

根據近幾年來世界上幾個著名災害性地震之調查結果，顯示鄰近斷層帶之結構物受到地震破壞之原因。除了強地動外，另一主要因素為活動斷層之斷盤錯動所導致之近地表岩土層變形。以 1999 年集集地震為例，在斷層作用時之斷層帶附近，大多數結構物均遭受到嚴重損毀。然而少數結構物即使位於斷層帶，結構體本身卻僅有剛體位移或轉動而未受損。因此斷層作用時，近地表岩土層變形行為與此一變形對人工結構物之影響，實有進一步研究之需要。

目前對於活動斷層近地表變形特性的研究在研究方法大致上可以分為現地調查、物理模型試驗以及數值分析等三大類，本計畫之研究為突破單一方法學提出結果之侷限性，因此併用現地調查、物理模型實驗(離心機砂箱試驗、1g砂箱實驗)及數值分析之方法，分別進行基本行為觀察及定量分析。第一年將針對逆斷層，選擇車籠埔斷層為主要研究對象，探討斷層兩側岩層變形行為(包含剪切帶發育、遷移及影響參數等)、斷層錯移在近地表可能影響範圍；進行離心機砂箱實驗，探討逆斷層錯動時，上覆岩土層變形行為及對結構物之影響。並以砂箱實驗配置與實驗所得之材料參數進行數值分析，以測定邊界條件及輸入參數之合理性。再將已驗證之數值分析工具，以全尺度數值分析探討斷層作用時上覆土層變形行為，及其對人工結構物之影響，並提出較合理的安全性探討指標，作為判斷建築物或設施安全性的參考。

現地調查方面，以橫跨集集地表破裂跡的的竹山槽溝及相鄰地區的調查結果為例，近斷層之變形特徵(包括地表的破裂變形帶範圍及變形帶與槽溝剖面中的變形特徵)，基本上是無法由航照或衛星影像判釋得知，雖集集地震距今已 10 年以上，但現地地表的特徵仍顯示震後的地形變化及部份的地表變形，現地調查仍有對近地表變形的了解有很大的助益。透過槽溝剖面輔以鄰近工程鑽井岩心產狀及過去試驗報告顯示，上覆變形土層主要為砂礫層、卵礫石層、偶夾黏土層及砂

層，它們的層序關係及性質亦輔助本研究數值模擬的模型之建立。

砂箱實驗方面，鑑於過去對影響斷層跡出現在地表位置的因素之研究，優先探討上覆土層厚度及相對密度這兩個變因，對斷層引致的變形範圍及斷層跡出露地表位置的影響程度。並為確保斷層模擬試驗箱在80g的重力場，仍能保持平面應變狀態，箱壁不會產生塑性應變，造成永久變位，所以進行試驗階段最大受力狀況下的應力分析，分析後採用 30mm 作為最終試驗箱的箱壁版厚，底板厚度則採用 35 mm 的版厚，並透過監測儀器提供遠端控制及擷取感測器在不同歷時的資料。

數值分析方面，以邊界元素法模擬斷層錯動擴展所造成的地表變形帶。在這簡單的模型裡影響變形帶形成的參數，僅有斷層的角度、錯動量與其類型及地表物質的強度。其中變形帶上下盤的寬度比 w_{HW}/w_{FW} 僅與斷層的角度及類型有關，而變形帶寬度 w = w_{HW}/w_{FW} 則與所有參數相關連。豐原中正公園的變形帶，寬為346-350 公尺，就主要斷層地表跡為分區界限，東側為上盤，西側為下盤，就背衝斷層地表跡為分區界限，東側為下盤，西側為上盤，兩側寬度及高度不均稱，w_{HW}/w_{FW}= 11.5，模型推估所得斷層的角度約為 16 度。竹山他里溫的變形帶，寬度沿斷層跡變化約在 50 到 100 公尺間，由於斷層的角度已知為 24 度，找出相對應的上下盤的寬度比 w_{HW}/w_{FW}=5，這與野外調查所認定的在上盤的變形帶相對下盤較寬，合理可接受。

以有限差分法模擬基盤中的斷層錯動對上覆土層的變形，可以觀察到斷層尖端點前緣有一三角形之剪應變集中範圍，此與三角形剪切帶模式描述相符。這塑性應變帶的發育隨斷層錯動量的增大隨之變化：在斷層錯動的初期塑性應變帶僅發生在斷層的尖端前緣，且往地表擴展，當斷層錯動達相當量時，近地表處也可能會有另一區的塑性變形出現，當錯動量更大時，兩塑性變形區帶將相連，此時的塑性應變集中區在斷層尖端點前緣並延伸至地表。

以離散元素法模擬上述相似的情況，但將上覆土層分成兩層或三層，分別模擬「砂土覆蓋於黏土層上」、「黏土覆蓋於砂土層上」及「黏土中間夾砂土層」三種案例。然而離散元素法中使用之微觀參數與力學實驗室之巨觀參數尚無統一轉換之理論研究，僅能暫且用數值參數之鍵結力模擬凝聚力，並將鍵結斷裂位置視為土層破裂位置。模擬結果顯示，鍵結力下降，土層破裂至地表範圍越廣。

透過不同分析方法了解位於地表下的斷層尖端擴展受上覆岩土層對斷層跡修飾的效應，探討隨斷層尖端擴展主要變形區內土體內應力、應變的空間分布，未來可用於探討斷層作用時，其對結構物之影響，對學理上斷層帶退縮距離的決定相當重要。另外加強對斷層錯動-土壤-結構互制的了解，針對直接承受斷層錯動衝擊的結構物，如何強化結構設計，盡量減少衝擊的程度也是地震減災可行的方法。

關鍵詞：活動斷層、近地表變形、離心機砂箱實驗、土壤結構互制、退縮距離、減災工法

ABSTRACT

According to the investigations of well-known disastrous earthquakes in recent years, distortion of ground induced by faulting is one distinct cause of damage to near-fault engineering structures in addition to strong ground motion. Taking the 1999 Chi-Chi earthquake as an example, most of the engineering structures within the earthquake-induced deformation zone were severely damaged. Conversely, a few buildings in the zone retained intact although those buildings had been displaced and rotated. Therefore, characteristics of fault-related deformation on the ground and near ground ,and its effect on engineering structures within are worthy of further study.

Currently the approaches to investigate the near ground deformation due to reactivation of active faults can be categorized as (1) field investigation (2) laboratory testing and (3) numerical modeling. In order to breakthrough the limitation of individual approach, field investigation, numerical modeling along with laboratory testing, including sand box experiments under both 1-g and centrifuge conditions, will be conducted for characterizing and quantitating deformation induced by faulting in this study. The first-year target is pined on the type of thrust faults. The Chelongpu fault, which is thrust-dominated, is chosen to investigate deformation behavior of the soil/rock mass straddled the fault trace (including initiation and development of the shear zone, and its affecting factors) and affected extent due to its reactivation.

Fault sandbox experiments under centrifuge conditions (hereinafter referred to as centrifuge testing) will be performed to gain insights on the deformation behavior of the soil/rock mass associated with faulting as well as the response of the foundation.

Boundary conditions and parameter values for numerical models will be verified based on the configurations of the centrifuge testing and its resultant parameter values. Thus, full-scale numerical modeling can be carried out for studying the deformation behavior of the soil/rock mass and its effect on engineering structures. In consequence, reasonable safety indices can be suggested as safety assessment of buildings and infrastructure.

As for the field investigation, Taken from all surveys we conducted is an example of the investigation of the near-fault deformation on the Chushan trench and its surrounding. Based only on airborne or satellite images, it is not possible to identify the characteristics of near-fault deformation, including the width of the earthquake-induced deformation zone, the small-scaled deformed features within the zone and the trench walls, and so on. The morphological features of the current ground surface still exhibits the change of the in-situ topography and partial ground distortion induced by the earthquake. Therefore, the field investigation certainly benefits us in understanding earthquake-induced deformation zone. Through a compilation of sedimentary columns of the trench walls, the drilling cores from the nearby sites and the previous report on the soil tests, the deformed cover are composed by layers of sandy gravel and pebble-sized gravel, and alternative clayey and sandy layers. Their order and properties are used to constrain the set-ups of our numerical models.

As for sandbox experiments, the effect of two factors, which are the thickness of the soil cover and its density is firstly explored on the extent of fault-induced deformation and the location of fault trace on the ground in the light of previous studies. The stress analysis for the experimental box is conducted beforehand in order to assure that the sandbox remains a status of plane-strain without permanent strain occurred beyond the limit of plasticity under a centrifuge condition of 80-g. After the analysis, a standard of 30-mm thick for lateral walls and 35-mm thick for the bottom is adopted for our sandbox. In addition, attached to the sandbox there is a monitor which provides a function of remote control and data transmission from sensors during an experiment.

As for the numerical modeling, ground deformation zone produced by propagation of fault slip is simulated via a boundary element method. In this simplified model, there are only a few parameters affecting the formation of a deformation zone: fault angle, fault slip, type of fault, and the strength of make-up of a ground. The w_{HW}/ w_{FW}, width ratio of the width, w_{HW}, of the zone of permanent deformation in the hanging wall to that in the footwall, w_{FW}, is related only with the angle and type of the fault; however, the $w = w_{HW} + w_{FW}$, total width of a deformation zone is a function of all the parameters. The width of the deformation zone at the Chung-Cheng park, Fengyung, is about 350 m. The zone was divided by the main fault trace. The eastern part was in the hanging wall while the western part was in the footwall. Their widths were highly unequal, that is w_{HW}/ w_{FW} =11.5. The value of width ratio corresponds to a fault angle of 16.5°. The width of the deformation zone at Tanliwun, Chushan, varied between 50 and 100 meters along the fault trace. The known fault angle of 24° corresponds to the width ratio, w_{HW}/ w_{FW}, of 5. It is consistent with the field observation that the width of the zone of permanent deformation in the hanging wall was much wider than that in the footwall.

A finite differential method is adopted to simulate the deformation within a soil cover induced by faulting of an underlying basement. It is observable that there is a triangular localized zone of high shear strain ahead of the upper tip of a fault. This shear zone develops with an increase of fault offset: In the early stage, a zone of highly shear strain appears ahead of the upper tip of a fault and propagates towards to the ground surface. While the fault offset reaches to a certain amount, another localized shear zone occurs near the ground surface. These two zones join at last. At this stage, the localized shear zone extends from the upper tip of the fault to the ground surface.

A discrete element method is also used to simulate a similar setting but the soil cover consists of two or three layers with a different mechanical property. Three kinds of packages for the soil cover are analyzed: a clayed layer overlaid with a sandy layer, a sandy layer overlaid with a clayed layer and a clayed layer sandwiched by two sandy layers. However, there is no standard conversion between the micro parameters for a discrete element model and the macro parameters used in a mechanical lab. A tentative way is to simulate the cohesion of a soil with a numerical parameter of bonding and treat the break of bonds as fractures in the soil. Our result shows that the weaker the bonds are, the wider the fracture zone is.

Taking these different approaches, we anticipate to enhance our understanding on how propagation of fault-tip affects the width of deformation zone on the ground of the soil/rock mass, the spatial distribution of strain and stress within the zone, and the foundation response. These analyses shall help us determine theoretical setback widths used to avoid the earthquake hazard due to distortion of ground induced by faulting. In addition, modification of the design methods of the foundations by studying the interaction among the fault rupture, geomaterial and foundation is another useful means to mitigate an earthquake hazard associated with soil structure interaction inducing by faulting.

KEYWORDS: active faults, near-ground deformation, centrifuge testing, soil structure interaction, setback width, hazard mitigation strategy

圖目錄

圖 1-1-1 豐原中正公園附近之車籠埔斷層近地表變形.....2
圖 1-1-2 台灣活動斷層分布圖.....3
圖 1-1-3 三種研究方法間之整合關係.....7
圖 1-1-4 本研究流程圖.....8
圖 2-1-1 活動斷層地表破裂跡的製圖型態.....13
圖 2-1-2 正斷層引致之地盤變形分佈.....13
圖 2-1-3 逆斷層引致之地盤變形分佈.....13
圖 2-1-4 汶川地震區域內不同覆土材料對地表變形特徵的影響.....14
圖 2-1-5 映秀－北川斷層沿線的地盤二維及三維變形特徵之分類.....14
圖 2-1-6 映秀－北川斷層沿線的地表變形量.....15
圖 2-1-7 車籠埔斷層地表破裂形貌.....18
圖 2-1-8 車籠埔斷層沿線的地盤變形變形帶之分類.....19
圖 2-1-9 集集地震車籠埔斷層近地表變形特性與變形影響範圍示意圖.....19
圖 2-1-10 車籠埔斷層之斷層分段、斷層面上滑移量、與挖溝位置圖.....20
圖 2-2-1 離心模型、數值或分析模型及現場全尺度試驗相互關係.....29
圖 2-2-2 斷盤錯動時上覆土層與淺基礎之互制行為.....29
圖 2-2-3 1G 模型及 100G 模型試驗，垂直正斷層錯動破裂跡之比較.....30
圖 2-2-4 英國 DUNDEE 大學油壓千斤頂驅動的斷層模擬離心模型試驗箱.....30
圖 2-2-5 原型、1G 模型與離心模型不同深度處對應點覆土應力之比較.....31
圖 2-2-6 土壩原型與 1/N 縮尺離心土壩模型.....31
圖 3-1-1 921 地震斷層沿線槽溝分布位置.....40
圖 3-1-2 竹山槽溝附近災前五千分之一地形圖.....41
圖 3-1-3 竹山槽溝附近災後五千分之一地形圖.....41
圖 3-1-4 南投縣竹山鎮他里溫九二一車籠埔斷層地表的變形帶。.....42
圖 3-1-5 車籠埔斷層竹山槽溝北、南牆剖面.....42
圖 3-1-6 車籠埔斷層竹山槽溝北、南牆剖面之復原.....43
圖 3-1-7 車籠埔斷層竹山博物館預定地附近鑽井及工程鑽孔位置圖.....44
圖 3-1-8 竹山二號井(上盤鑽井)及竹山一號井(下盤鑽井)位置及地質圖.....45
圖 3-1-9 地質鑽探與竹山溝比對.....46
圖 3-1-10 竹山博物館鑽探位置.....48
圖 3-1-11 竹山博物館工程鑽孔 A2 及 A3 進行無圍壓縮試驗應力應變曲線.....49
圖 3-1-12 三軸壓密不排水壓縮試驗應力應變曲線.....49
圖 3-1-13 以標準貫入試驗 N 值推估彈性模數.....50
圖 3-1-14 車籠埔斷層近豐原中正公園北、南井位置圖.....52
圖 3-1-15 車籠埔斷層近豐原中正公園災前後正射影像.....52

圖 3-1-16 九二一地震地表變形帶前緣基本的三類地形崖.....60
圖 3-1-17 台灣中部九二一地震地表變形帶及其鄰近的地質架構.....61
圖 3-1-18 大甲溪河床上九二一地震引致的地形崖。.....62
圖 3-1-19 牛欄溪及近處的九二一地震引致之地形崖.....62
圖 3-1-20 大里溪及近處的九二一地震引致之地形崖.....63
圖 3-1-21 霧峰光復國中及近處的九二一地震引致之地形崖.....63
圖 3-1-22 中寮釋迦園的九二一地震引致之地形崖.....64
圖 3-1-23 名間地區的九二一地震引致之地形崖。A.B.兩地約離 1 公里.....64
圖 3-1-24 濁水溪南岸水底寮的九二一地震引致之地形崖.....64
圖 3-1-25 濁水溪南岸竹山他里溫的槽溝剖面及開挖前的九二一地震引致之地形崖..65
圖 3-1-26 九二一地震地表變形帶前緣地形崖的形貌.....66
圖 3-1-27 豐原中正公園九二一地震地表變形帶及其中構造分布和建築物破壞情形..67
圖 3-1-28 豐原中正公園九二一地震地表變形帶西緣主要地形崖及人造建物損的情形
.....68
圖 3-1-29 豐原中正公園九二一地震地表變形帶東緣的地形崖.....68
圖 3-1-30 豐原中正公園九二一地震地表變形帶中的構造.....68
圖 3-1-31 豐原市、潭子鄉地表破裂及露頭點位置圖.....69
圖 3-1-32 豐原市、潭子鄉區域航照.....70
圖 3-1-33 空拍照片，圖中斷層跡通過之兩棟建築物有不同的變形結果.....71
圖 3-1-34 北側房屋，斷層跡由屋後繞過.....71
圖 3-1-35 北側房屋現況.....71
圖 3-1-36 南側房屋，斷層跡造成房屋傾斜變形.....71
圖 3-1-37 南側房屋周圍已進行重建.....71
圖 3-1-38 竹山他里溫九二一地震地表變形帶.....73
圖 3-1-39 他里溫地區的竹山槽溝空照圖.....73
圖 3-1-40 他里溫地區九二一地震斷層上盤三合院中的地表破裂情形.....74
圖 3-1-41 他里溫地區九二一地震斷層上盤三合院的正房遭地表隆升破壞的情形.....75
圖 3-1-42 他里溫地區九二一地震斷層下盤三合院的柏油庭院的破壞情形.....76
圖 3-1-43 大里市、霧峰鄉地表破裂及露頭點位置圖.....78
圖 3-1-44 大里市、霧峰鄉區域航照.....79
圖 3-1-45 車籠埔斷層自健行路民房下方經過.....80
圖 3-1-46 民房現況.....80
圖 3-1-47 民房整體抬升約 1 公尺.....80
圖 3-1-48 民房後方僅以 H 型鋼支撐.....80
圖 3-1-49 斷層穿過健行路尾端路面抬升約 2 公尺.....81
圖 3-1-50 斷層穿過健行路尾端路面抬升約 2 公尺現況.....81
圖 3-1-51 斷層穿過健行路尾端.....81

圖 3-1-52 房屋採大樓基礎建設.....81
圖 3-1-53 太平市地表破裂及露頭點位置圖.....82
圖 3-1-54 太平市區域航照.....83
圖 3-1-55 一江橋南岸橋頭.....84
圖 3-1-56 民眾自行將其扶正現況.....84
圖 3-1-57 潭子鄉、北屯區、太平市地表破裂及露頭點位置圖.....85
圖 3-1-58 潭子鄉、北屯區、太平市區域航照.....86
圖 3-1-59 廊子坑路在廊子橋南側.....87
圖 3-1-60 11 間民房.....87
圖 3-1-61 竹山 A-A 與 B-B 測線位置圖.....89
圖 3-1-62 竹山地區測線與槽溝比較.....90
圖 3-1-63 由北而南－新城斷層(紅)、青草湖向斜(綠)與寶山背斜(黃)的相互關係.....94
圖 3-1-64 新城斷層(紅)、青草湖向斜(綠)與寶山背斜(黃)的剖面關係.....95
圖 3-1-65 寶山背斜的深井.....95
圖 3-1-66 新城斷層槽溝北、南牆剖面.....96
圖 3-1-67 新城斷層沿線鑽井位置圖.....97
圖 3-1-68 麻園肚鑽井位置圖.....98
圖 3-1-69 新城三、四、五號鑽井相對位置圖.....98
圖 3-1-70 新城一號及二號鑽井相對位置圖.....99
圖 3-1-71 國家地震中心測站與新城斷層相對位置圖 (僅列出較靠近斷層之測站)...100
圖 3-1-72 野外觀察點及新城斷層條帶地質圖.....100
圖 3-1-73 野外觀察點及新竹-竹南海岸地區地質圖.....101
圖 3-1-74 野外觀察點文獻及現況 I.....101
圖 3-1-75 野外觀察點文獻及現況 II.....102
圖 3-1-76 野外觀察點文獻及現況 III.....102
圖 3-1-77 篤行工程井位置圖.....103
圖 3-1-78 中正公園槽溝南北剖面圖.....111
圖 3-1-79 新竹篤行 1 號槽溝南北剖面圖.....112
圖 3-1-80 新竹篤行 2 號槽溝南北剖面圖.....113
圖 3-2-1 1G 逆斷層砂箱模型試驗示意圖.....127
圖 3-2-2 不同逆斷層傾角與斷層錯動範圍的試驗結果.....127
圖 3-2-3 逆斷層傾角與斷層錯動範圍關係.....128
圖 3-2-4 逆斷層抬升距離與斷層破裂跡發展長度關係.....128
圖 3-2-5 中央大學離心機示意圖.....129
圖 3-2-6 中央大學離心機掛台與 1-D 振動台掛台.....129
圖 3-2-7 中央大學土木系現有離心模型試驗箱.....130
圖 3-2-8 中央大學離心機掛台空間的限制.....131

圖 3-2-9 中央大學離心機掛台空間的限制(UNIT : M) 132
圖 3-2-10 (A)斷層模擬試驗箱前視圖; (B) 斷層模擬試驗箱側視圖 132
圖 3-2-11 斷層頂升或下降機構 133
圖 3-2-12 試驗箱 80G 應力分析 133
圖 3-2-13 試驗土樣之粒徑分佈圖 134
圖 3-2-14 試驗土樣放大兩百倍之顯微攝影圖 134
圖 3-2-15 直接剪力試驗相對密度 40％ 正向力與剪應力之關係 135
圖 3-2-16 直接剪力試驗相對密度與摩擦角之關係 135
圖 3-2-17 移動式霣降機之示意圖 136
圖 3-2-18 移動式霣降機實景 137
圖 3-2-19 盛土漏斗 137
圖 3-2-20 振動台控制及資料擷取系統的傳輸構成 137
圖 3-2-21 斷層模擬試驗箱的側視圖 138
圖 3-2-23 斷層模擬試驗箱的斜視圖 138
圖 3-2-24 斷層模擬試驗箱的斷層頂升塊頂升級下降機構 138
圖 3-2-25 斷層模擬試驗箱的影像拍攝 138
圖 3-2-26 斷層錯動在不同錯動位移斷層跡的發展影像(1GRTEST1) 140
圖 3-2-27 斷層錯動在不同錯動位移地表的垂直變位(1GRTEST1) 141
圖 3-2-28 PIV 分析斷層錯動在不同錯動位移地層及地表的變位(1GRTEST1) 143
圖 3-2-29 斷層錯動在不同錯動位移斷層跡的發展影像(1GRTEST2) 145
圖 3-2-30 斷層錯動在不同錯動垂直抬升量地表的垂直變位(1GRTEST2) 146
圖 3-2-30 斷層錯動在不同錯動垂直抬升量地表的垂直變位(1GRTEST2)(續) 147
圖 3-2-31 PIV 分析斷層錯動在不同錯動抬升量地層及地表的變位(1GRTEST2) 148
圖 3-2-32 不同斷層垂直錯動抬升量，地表的頂升曲線(1GRTEST1) 149
圖 3-2-33 不同斷層垂直錯動抬升量，地表的頂升曲線(1GRTEST2) 149
圖 3-2-34 PIV 分析斷層錯動在不同錯動抬升量地層及地表的變位(1GRTEST3) 149
圖 3-2-35 不同斷層垂直錯動抬升量，地表的頂升曲線(1GRTEST3) 150
圖 3-2-36 斷層錯動在不同錯動抬升量地層及地表的變位(1GRTEST4) 151
圖 3-2-37 不同斷層垂直錯動抬升量，地表的頂升曲線(1GRTEST4) 154
圖 3-2-38 不同斷層垂直錯動抬升量，地表的正規化頂升曲線(1GRTEST1) 154
圖 3-2-39 不同斷層垂直錯動抬升量，地表的正規化頂升曲線(1GRTEST2) 154
圖 3-2-40 不同斷層垂直錯動抬升量，地表的正規化頂升曲線(1GRTEST3) 154
圖 3-2-41 不同斷層垂直錯動抬升量，地表的正規化頂升曲線(1GRTEST4) 154
圖 3-2-42 地表正規化頂升量與正規化距斷層尖端出露距離的關係 154
圖 3-2-43 放置於離心掛台之斷層錯動模擬試驗箱-側視圖 155
圖 3-2-44 放置於離心掛台之斷層錯動模擬試驗箱-頂視圖 155
圖 3-2-45 斷層錯動模擬試驗箱側視圖 155

圖 3-2-46 斷層錯動模擬試驗試驗過程.....155
圖 3-2-48 頂升試驗完成試體側視及頂視圖(10GREST1).....155
圖 3-2-47 試驗箱吊離離心機坑.....156
圖 3-2-49 斷層垂直錯動抬升量(3.51 CM)，地表的頂升曲線(10GRTEST1).....156
圖 3-2-50 斷層垂直錯動抬升量(3.51 CM)，地表的正規化頂升曲線(10GRTEST1)...156
圖 3-2-51 斷層垂直錯動抬升量(3.51 CM)，1G 及 10G 試驗所得地表正規化頂升曲線的比較.....156
圖 3-3-1 斷層錯動擴展的模擬示意.....159
圖 3-3-2 彈塑性物質在持續加載(LOADING)下的變形路徑。.....160
圖 3-3-3 永久變形帶如何在地表演化形成的過程.....165
圖 3-3-4 理想永久變形帶，左欄為走向滑移斷層，右欄為逆斷層，斷層傾向右側或呈垂直.....167
圖 3-3-5 永久變形帶的參數間的關係。.....169
圖 3-3-6 傾向滑移斷層其斷層寬度對錯動量的比值 WF/S 與關鍵偏差應變第二不變量(II'E)C 的關係。.....171
圖 3-3-7 中正公園變形帶中應變與離斷層跡相對位置的關係圖。.....172
圖 3-3-8 竹山他里溫變形帶中應變與離斷層跡相對位置的關係圖。.....173
圖 3-3-9 新城斷層觸發變形帶中應變與離斷層跡相對位置的關係圖。.....176
圖 3-3-10 FLAC 分析模型示意圖.....181
圖 3-3-11 數值分析模型之分析網格數及模型尺寸.....181
圖 3-3-12 數值分析模型初始狀態.....181
圖 3-3-13 數值分析模型給定邊界位移以模擬基盤抬升.....182
圖 3-3-14 不同斷層滑移量之累積塑性剪應變分佈圖.....183
圖 3-3-15 數值模擬分析尺寸(模擬室內實驗).....185
圖 3-3-16 物理試驗參數示意圖.....187
圖 3-3-17 數值模擬模型.....188
圖 3-3-18 砂土層覆蓋於黏土層之上.....189
圖 3-3-19 黏土層覆蓋於砂土層之上.....190
圖 3-3-20 不同斷盤抬升量下之斷層帶的位置.....192
圖 3-3-21 砂黏土互層形態對斷層影響範圍(W/H)之影響.....194
圖 3-3-22 砂土層覆蓋於黏土層之上 (A) 斷層傾角 60 度(B) 斷層傾角 24 度.....195
圖 3-3-23 較數值模擬與室內實驗(A)數值模擬(B)室內實驗.....196
圖 3-3-24 現地狀況數值模擬之尺寸.....198
圖 3-3-25 現地狀況與數值模擬結果比較.....199
圖 3-3-26 地表結構物對斷層帶發展範圍之影響砂箱實驗尺寸示意圖.....200

表目錄

表 2-1-1 岩石與土壤之相關室內試驗項目及說明 11
表 2-2-1 離心模型與原型之相似性比較 28
表 2-4-1 斷層作用引致上覆土層變形行為對建築物影響之文獻摘錄 33
表 2-4-2 斷層作用引致上覆土層變形行為對地下結構物影響文獻摘錄 34
表 2-5-1 研究方法之限制與三種方法使用上之比較 36
表 3-1 我國有關活動斷層之土地管理法規整理 38
表 3-1-1 921 地震斷層沿線槽溝彙整表 40
表 3-1-3 中正公園北、南井岩心室內實驗結果 59
表 3-1-4 新城斷層過去文獻 91
表 3-1-5 篤行工程井岩心室內實驗結果 107
表 3-1-6 槽溝位置座標 107
表 3-1-7 中正公園北、南井取樣之土壤力學地層描述 114
表 3-1-8 篤行工程井取樣之土壤力學地層描述 114
表 3-2-1 試驗土樣之基本物理性質 124
表 3-2-2 1-G 正斷層錯動模型試驗種類 126
表 3-3-1 豐原中正公園的地表變形之參數值 171
表 3-3-2 竹山他里溫地表變形之參數值 173
表 3-3-3 新城斷層之參\數值 175
表 3-3-4 基本案例之上覆土層材料參數 180
表 3-3-5 數值模擬規劃(模擬室內實驗) 185
表 3-3-6 數值分析所用參數 186
表 3-3-7 參數矩陣 186
表 3-3-8 參數敏感度分析結果 189
表 3-3-9 不同斷盤抬升量所形成之斷層影響範圍 191
表 3-3-10 不同砂黏土互層形態所形成的斷層影響範圍(W/H) 193
表 3-3-11 現地狀況數值模擬之基本參數 197
表 3-3-12 現地狀況數值模擬之基本參數 200

第一章、前言

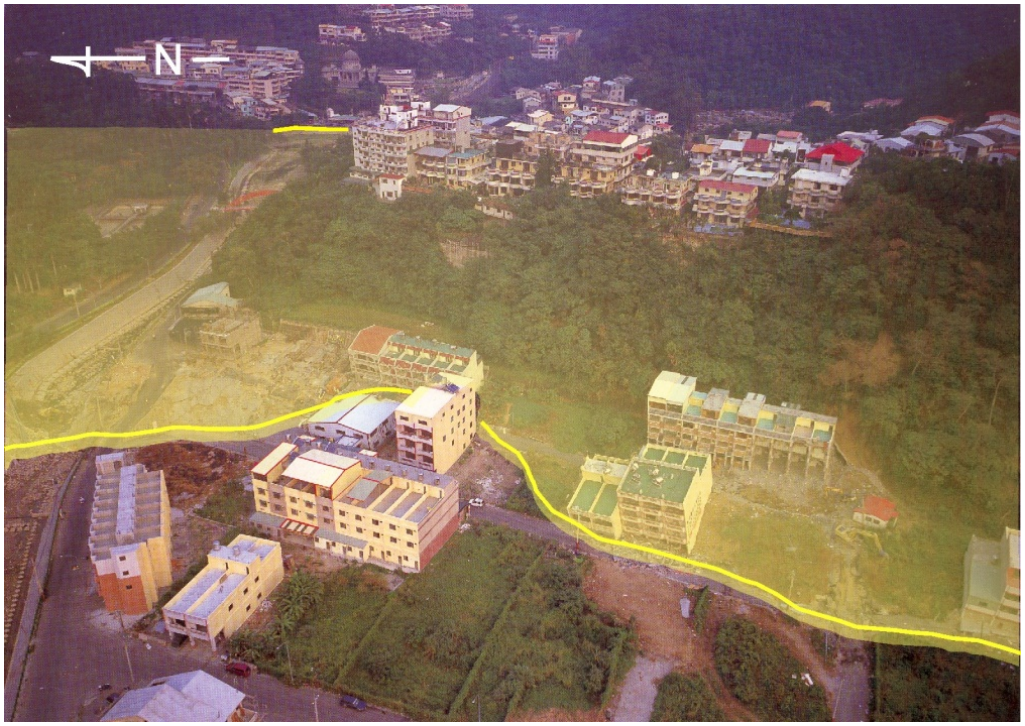
1. 計畫背景

活動斷層是指過去近期曾活動，並且可能在不久的將來再次發生錯動的斷層。斷層一旦發生錯動，除了激發一般暫態強烈的地震波外，還有地盤錯動所造成的地表永久變形，這兩種特殊的破壞機制皆足以對地上結構物造成嚴重破壞。結構物受到地盤暫態震動引致的動態反應，一直受到相當的重視，也已有相當深入的研究成果。地層變形包括地震伴生之斷層錯動、地層液化與邊坡滑動等，所產生永久或塑性變形，其亦會引致結構物(包括建築物及設施)嚴重變形而損壞。其中，1999 年集集地震、1999 年土耳其的 kocaeli 地震及 2008 年汶川地震所伴隨的地表變形與破裂，對地表或地下結構物所造成之嚴重損害皆引起大家對此議題的注意，然而，少數結構物(如圖 1-1-1b 所示)即使位於地表破裂跡上方，結構體本身卻僅有剛體位移而並未受損。目前，斷層錯動引致之近地表變形特徵以及上覆土層之變形行為與鄰近結構物所受之影響，相對而言仍較少有深入的研究。

臺灣由於位在「環太平洋地震帶」上，所以有感地震頻繁，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 2010 年出版之臺灣活動斷層分布圖(圖 1-1-2)及地震地質與地變動潛勢分析計畫的研究成果(表 1-1-1)，目前共有 33 條活動斷層，其中有 20 條是第一類活動斷層。此 20 條第一類活動斷層中，有 10 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。

針對 1999 年地質調查所的集集地震車籠埔斷層槽溝挖掘調查之研究結果顯示，每次大地震造成之地表破裂跡位置，是依其覆蓋在基盤之上覆土層厚度而定，當上覆土層厚度愈厚，材料性質愈疏鬆，斷層可能出露地表的位置變動性愈大。此外，斷層面並非單一的斷層面，而是有多條斷層面存在。由定年資料顯示，斷層作

用具有重複性，故對於斷層帶附近建築物之安全性必須被特別注意。希望透過本計畫的研究，可瞭解斷層活動時地表附近可能的變形特性與影響範圍的大小，以提供研擬或修正地質法之子法中，有關活動斷層地質敏感區範圍劃設依據的參考。



(a)空拍照片，圖中斷層跡通過之兩棟建築物有不同的變形結果(連永旺)



(b)北側房屋，斷層跡由屋後繞過(劉桓吉)



(c)南側房屋，斷層跡造成房屋傾斜變形(劉桓吉)

圖 1-1-1 豐原中正公園附近之車籠埔斷層近地表變形

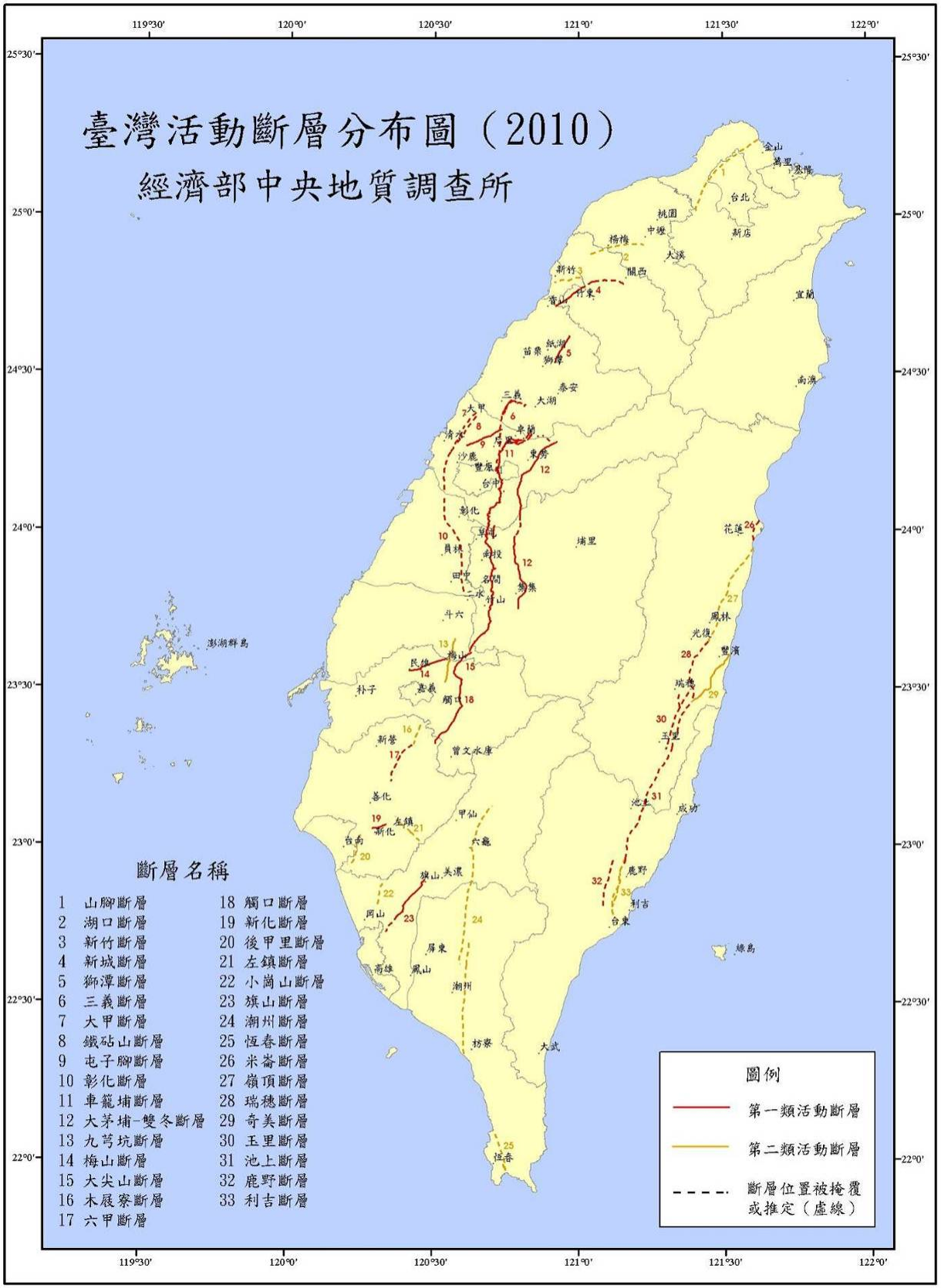


圖 1-1-2 台灣活動斷層分布圖(中央地質調查所，2010)

表 1-1-1 台灣活動斷層參數資料表(中央地質調查所，2010)

台灣活動斷層參數資料表

2010.05 版

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)		22*			-0.6±5.2b	-1.2±6.2b	-2.2b	2.1±10.2b		2.2 v				
(南)	二	13a	正移 a	>60/東 a	-1.3±5.8b	-5.0±7.4b	-10.8 b	2.3±12.3b	1.8c 1.2u				<11,000a	(6.9)
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			0.2-4.1◎		<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	<1.2w		0.5-1.3◎		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			(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)

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					
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)
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	更新世晚期 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 小崙山斷層	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 7,189 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	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		21.6-27.7k 1.9-2.2◎	170-210k	A.D.1951	7.3 (6.7)
31 池上斷層	一	64*	左移兼逆移 s	67/東 o		17-191	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)

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					
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)

2. 研究目的

地調所於 91～95 年的「地震地質調查與活動斷層資料庫建置」計畫與 96～99 年的「地震地質與地變動潛勢分析」計畫，已完成與活動斷層相關之斷層位置、槽溝開挖、地質鑽探及地表變形觀測等成果，但是對於斷層**再活動**時，其對近地表附近岩層(包括地表之岩層與近代沖積物)與結構物將造成何種影響之資訊仍十分欠缺，故對於斷層活動與地震防災而言仍有不足。

因此，本研究計畫是為了減低和避免斷層活動所造成的破壞或影響，規劃以上述之成果為基礎，運用室內實驗模型與數值模擬方法，針對斷層與兩側岩層性質及結構物基礎型式之交互作用進行研究，以達成下列目標：

I. 探討斷層兩側岩層變形行為(包含剪切帶發育、遷移及其影響參數等)

II. 斷層錯移在近地表之可能影響範圍。

III. 提出較合理的安全性探討指標，作為判斷建築物或設施安全性的參考。

IV. 提供作為重要公共工程規劃與營運風險之參考。

3. 整體構想

有關活動斷層近地表變形特性的研究，最早是由幾位美國的地質師(如： G. K. Gilbert, F. E. Mattes, E.S. Larsen and A. Lawson 等)在調查 1906 年 San Francisco 地震的地表破裂跡(rupture)時，發現一極明顯且無庸致疑的現象，那就是地震斷層錯動後地表的變形在某些情況下是以脆性斷層或破裂帶的方式呈現，而在某些情況下則以塑性變形帶的方式呈現(Lawson *et. al*,1908; Reid, 1910)。經過了一百年來對不同地震所產生的變形帶之調查，紀錄顯示一地震地表變形的可能寬度從僅幾公尺到近半公里寬皆有可能，在這一範圍內通常包含超過一條以上的脆性斷層(或破裂帶)或塑性變形帶或兩者皆出現，且這樣的寬度變化除因地震的不同有別外，也出現在同一次地震的不同地點(例子如:Landers 地震，Johnson *et. al*, 1994；集集地震，Huang, 2006)。不過，大致上，這樣的變形帶裡，通常會有一條主要的斷層或

一數公尺寬的主要塑性變形帶，其吸引了大部份的相對水平錯動量及抬升量。

目前對於本計畫的研究，在研究方法大致上可以分為現地調查、物理模型試驗以及數值分析等三大類，三者之功用、目的與相互間之關係，如圖 1-1-3 所示。茲分述如下：

I. **現地調查方面：**現地調查資料除可提供物理模型試驗及數值分析，簡化所需之資訊外。更可作為物理模型試驗與數值分析成果之驗證，以提供各種分析工具可行性之檢驗。主要的工作項目包括：利用已完成之活動斷層相關之斷層位置、槽溝開挖、地質鑽探及地表變形觀測等成果之回顧與整合分析，配合地調所新增之鑽孔調查分析與力學參數推求，建立地質土壤分層與工程力學性質分類間之關聯，並歸納整理斷層沿線之土壤性質及其分佈，了解可能之土壤性質合理範圍，建立簡化土層參數表。必要時佐以活動斷層跡及現地地表變形之補充調查，唯此一部份要能在短時間內有成果，可能要藉助請教一些對研究斷層(如車籠埔斷層、新城斷層)長期進行現地調查研究專家，對野外露頭點及現象的協助與顧問。

II. **物理模型試驗方面：**現地實驗是最直接可靠之方法，但較昂貴且參數控制困難，故國內外尚無實例。利用小尺度之 1g 模型試驗可提供斷層作用上覆土層變形之基本行為，並可作為數值分析選取合理分析參數及邊界條件等比對與成果相互驗證之參考，而主持人在此方面已有一定的研究成果，但若要直接應用於現地調查，則必須考慮尺度效應之影響。由於國外的研究已有利用可模擬重力環境的離心機砂箱試驗的研究成果，因此本計畫將與協同主持人及研究員合作，利用中央大學進行可模擬重力環境的離心機砂箱試驗與定量數值模擬分析，以彌補既有研究經驗之不足。離心機實驗的部份，將進行正、逆斷層的模型試驗，規劃在第一、二年進行；小尺度 1g 模型試驗部分，，將沿用既有的逆斷層與正斷層研究成果，而平移(或逆移斷層)砂箱的部份，則規劃在第三、四年時進行。

III. **數值分析方面：**數值分析是方便且有力之工具，除了可利用其了解斷層作用之基本行為外，更可進行定量分析。然數值分析受限於邊界條件、輸入參數等之

正確性，往往對於其結果有極大影響，因此在應用時，其正確性之驗證須特別注意，通常須有砂箱實驗或現地實例與之比較驗証。主持人已有用連續體力學有限元素法(ABAQUS)模擬二維逆斷層與正斷層之經驗，為了進一步了解土壤為顆粒材料組成特性的影響，第一年可能同時嘗試以分離元素法程式(PFC2D)、有限差分法(FLAC)或邊界元素法進行砂箱成果及現地變形剖面之模擬。採用有限元素法及有限差分法的優點在於目前已有分析經驗，且可以進行土壤－結構互制之分析；邊界元素法的優點在計算上效能最高，唯不易進行土壤結構互制模擬；分離元素法的優點在於它最接近地表岩土層之顆粒行為，對剪切帶發育行為較為相符。這些各種不同之模擬方法，預期在活動斷層地表變形與結構物互制變形分析中，非連續體模式會有一些不同於連續體模式的成果(如淺基礎的基腳模擬)。第二、三、四年將視第一年分析模擬成效，選用最合宜的模式進行其他種斷層之分析。

圖 1-1-3 三種研究方法間之整合關係

本計畫之研究為突破單一方法學所能提出結果之侷限性，採併用現地調查、物理模型實驗(離心機砂箱試驗、1g砂箱實驗)及數種數值分析之方法，分別進行基本行為觀察及定量分析，研究流程如圖 1-1-4 所示。

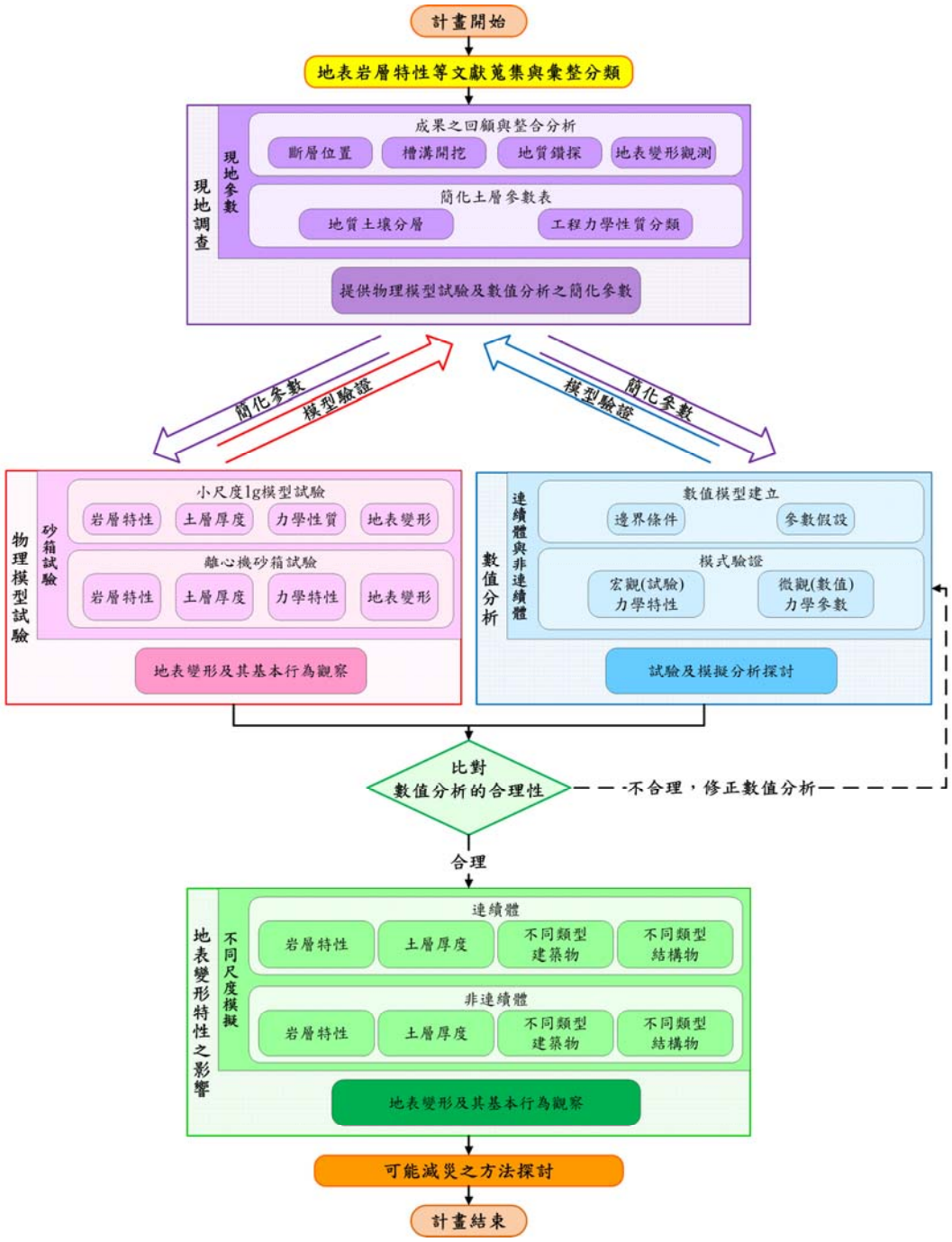

計畫開始
地表岩層特性等文獻蒐集與彙整分類
現地調查
現地參數
成果之回顧與整合分析
斷層位置
槽溝開挖
地質鑽探
地表變形觀測
簡化土層參數表
地質土壤分層
工程力學性質分類
提供物理模型試驗及數值分析之簡化參數
簡化參數
模型驗證
模型驗證
簡化參數
物理模型試驗
砂箱試驗
小尺度1g模型試驗
岩層特性
土層厚度
力學性質
地表變形
離心機砂箱試驗
岩層特性
土層厚度
力學特性
地表變形
地表變形及其基本行為觀察
數值分析
連續體與非連續體
數值模型建立
邊界條件
參數假設
模式驗證
宏觀(試驗)力學特性
微觀(數值)力學參數
試驗及模擬分析探討
比對數值分析的合理性
不合理，修正數值分析
合理
地表變形特性之影響
不同尺度模擬
連續體
岩層特性
土層厚度
不同類型建築物
不同類型結構物
非連續體
岩層特性
土層厚度
不同類型建築物
不同類型結構物
地表變形及其基本行為觀察
可能減災之方法探討
計畫結束

圖 1-1-4 本研究流程圖

第二章、研究方法

目前對於活動斷層近地表變形特性的研究在研究方法大致上可以分為現地調查、物理模型試驗以及數值分析等三大類，本活動斷層近地表變形特性研究為突破單一方法學提出結果之侷限性，因此併用現地調查、物理模型實驗(離心機砂箱試驗、1g 砂箱實驗)及數值分析之方法，分別進行基本行為觀察及定量分析。

地震引致地表破裂型態多元，斷層沿線土壤種類、厚度、物理特性等土層特性對破裂型態並無直接研究對應各別關係，根據地調所工程地質探勘資料庫統計車籠埔斷層沿線之土層特性資料，可知斷層沿線土層特性資料並不完善，故本研究選定斷層槽溝及槽溝鄰近之工程鑽孔，以獲取較豐富之土層特性資料，透過地層簡化以建立數值模型，**並以數值模型為主，物理模型為輔，利用物理模型進行修正及現地另一逆斷層進行驗證**，完成之數值模型可探討土層特性對地表變形型態影響，未來可用至土層特性影響土體應變分布，以至土體應變分布對鄰近人工結構物之互制關係。

一般而言，活動斷層附近地表變形特性研究所採行的技術、方法與工具說明如下：

1. 現地調查

活動斷層之地質學研究是古地震研究的一支，最普遍較為人知的教科書是 1996 年 McCalpin 的 Paleoseismology，該書並在 2009 年更新 2 版，加入了近 15 年來的最新研究及許多近地表變形特性現地調查成果(James P. McCalpin, 1996、2009)。活動斷層之近地表變形型態調查，有助於我們進一步瞭解斷層錯動時，近地表岩層及上覆沖積土層之行為，並可作為數值分析成果與試驗室物理模型試驗成果對比對及驗證之依據。

1-1. 地表變形調查

針對近斷層之地盤變形調查，一般採用之方法不外乎以下幾種方式(McCalpin,1996、2009)，目前地調所針對一些重要的活動斷層，已初步完成各項

調查。

(1)野外地表地形與地質調查

即親自至現地觀察地形之變化與露頭處之地質構造，惟由於清楚而具代表性之露頭不易尋覓，且地形之變化亦僅限於瞭解接近地表處之地層變形行為，無法得知地層剖面不同深度處之地盤破裂變形行為。

(2)地球物理探測

一般工程上常用之地球物理探測方式，係藉由量測地盤之物理特性(諸如波傳速度、電阻、密度、磁力等)，並判斷這些量測訊號在地盤中之變化或異常(含水平方向及鉛直方向)，以研判地盤中之介面(例如層面、不整合面、斷層、洞穴、水位等)，但由於其精確度較差，通常僅為初步研判地層剖面之輔助工具。但是在斷層跡為深厚土層覆蓋的場合，例如槽溝開挖無法達到的深度，地球物理方法是尋找基盤斷層方法與斷層傾角非常重要也不可或缺的方法。

(3)鑽探或槽溝開挖

為得到較精確之地層變形分佈行為，通常採用鑽探或槽溝開挖之方式，鑽探資料可提供深度較深處之地層(不連續)分佈資料，槽溝開挖則可觀察地層變形之連續性變化行為，但受限於地下水位與開挖面積之限制，無法提供深層之地層資料。惟不論鑽探或槽溝開挖，所需之經費與時間均較長，因此紀錄完整之近斷層地層變形資料甚為有限。另外，鑽探所取出的岩心可以進行室內的土壤力學及岩石力學實驗，以了解該處地層的力學性質，表 2-1-1 為中央地調所執行易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置計劃時針對岩心進行的岩力、土力實驗項目，本研究參照表，進行其中的 7 項實驗，並另外增加一項岩力實驗為點荷重實驗，用於推估礫石的單壓強度。

在以上的研究方法中，本研究採取野外調查來了解研究區域內地表地形的變化及地質構造；利用車籠埔斷層竹山槽溝開挖資料及文獻中在此槽溝附近之地球物理探測資料；並搭配中央地質調所發包給顏一勤地質技師事務所所進行的鑽探工程(地調所，2011)及岩力、土力實驗，來了解車籠埔斷層地表變形及地質構造及土壤、礫石、岩盤…等的力學性質。

表 2-1-1 岩石與土壤之相關室內試驗項目及說明(地調所，2011a)

項次	試驗項目	單位	數量	產出	用途
1	土壤一般物理性質試驗	組	30	含水量、單位重、比重、阿太堡限度	邊坡穩定分析所需之基本參數
2	土壤直剪試驗	組	6	剪力強度參數 (c, ϕ)	1. 評估近似水平破壞面之剪力強度參數 2. 主要適用於砂性土壤 3. 評估土壤長、短期剪力強度參數
3	土壤三軸透水試驗	組	6	土壤透水係數	1. 比對現地水力試驗成果 2. 提供地下水流場評估所需參數
4	土壤三軸壓縮強度試驗	組	6	剪力強度參數 (c, ϕ)	1. 評估土體潛在傾斜破壞面之剪力強度參數 2. 主要適用於黏性土壤 3. 評估土壤長、短期剪力強度參數
5	岩石一般物理性質試驗	組	25	含水量、單位重、比重、孔隙率及吸水率	集水區廣域水文地質及邊坡穩定分析所需之基本參數
6	岩石弱面直接剪力試驗	組	13	岩石滑動面特性	1. 提供岩石滑動面材料強度參數 2. 集水區廣域水文地質及邊坡穩定分析所需之基本參數
7	岩石彈性試驗	組	10	每組含動、靜彈試驗	1. 提供岩石變形模數 2. 山崩潛感與邊坡穩定分析所需之基本參數
8	岩石三軸試驗	組	10	含抗張、單壓、三軸	1. 提供岩石材料強度參數 2. 集水區廣域水文地質及邊坡穩定分析所需之基本參數
9	壓力鍋試驗	組	3	土壤水分特性曲線	評估不飽和土壤滲透特性，求取體積含水量隨基質吸力之變化

1-2. 地表破裂型態

A. 國外案例

由既有的研究結果得知 (例如 Bray *et al.*, 1994a、Lin *et. al.*, 2006)：影響斷層錯動出露自由場地表的位置及地表變形的因素包括：(1)斷層的錯動種類(正斷層(normal fault)、逆斷層(reverse fault)、平移斷層(strike-slip fault)、斷層傾斜角(dip angle))及錯動量的大小；(2)覆土層的厚度及其土壤性質(凝聚力、摩擦角及膨脹角Ψ)。現場調查結果顯示：深厚土層及延展性大的土壤比較會修飾斷層錯動對地表的影響；而較淺的土層及脆性土壤，則對地表的衝擊較大。當地表有結構物時，

會進一步修飾斷層錯動從岩盤傳遞至覆土層中的破裂痕跡。而修飾程度的大小則跟結構物的重量、基礎與覆土層土壤的相對勁度(foundation stiffness)、基礎的幾何大小(長、寬及深度)及基礎型式(淺基礎或深基礎)有直接的關係；而斷層錯動對不同基礎損害的程度，則跟基礎與自由場斷層出露線的相對位置也有關係。因此每一次災害性地震所產生之地震斷層及其所造成之近地表變形沿著地表斷層跡會有各種不同的變形型式。

Bonilla (1982)指出為了描繪地表斷層跡各種型態，應區分之主要破裂跡(main rupture)、分枝破裂跡(branch rupture)、以及次要破裂跡(secondary rupture)(圖 2-1-1)。**本研究活動斷層近地表變形特性研究主要是針對車籠埔斷層之單一主要破裂跡(逆斷層跡、背衝斷層跡)進行討論。**

Bray *et al.* (1994) 整理自 1915 年以來，世界各地發生大地震後之地盤變形調查資料，並依斷層之型態(正斷層及逆斷層)與覆土層之種類(較脆性及延展性)加以分類；整理結果顯示，逆衝斷層引致之地盤變形在接近地表處，通常具有較低之傾角，正斷層引致之地表變形則通常具有較陡之傾角，而延展性較佳之地層則較常見褶皺之現象，而無剪力錯動面從土層底部延伸至地表面，但接近地面土層可發現張力裂縫的現象。如圖 2-1-2 及圖 2-1-3 所示，其中(a)、(b)分別為不同傾角所引致之地層破裂面發展型態；(c)地表覆土層為延展性較佳之地層。而各種不同類型與土層特性的破裂發展型態的典型著名案例，可以由圖 2-1-2 及圖 2-1-3 中之左側之註記得知，而進一步深入參考查詢。

Lin et al. (2009) 整理汶川地震沿線地表變形，並納入不同地層的影響進行討論，透過圖 2-1-4 可明顯看出，當上覆土層不同時期斷層活動後地表變形特徵亦不相同，(a)逆斷層於基岩(岩盤)中發展、(b)上覆土層為薄層鬆散沉積物時，斷層崖易崩塌、(c)上覆土層為厚層沉積物時易發展為撓曲褶皺、(d)撓曲褶皺亦會發展更多裂隙構造、(e)上覆土層為黏性材料及鬆散沉積物時易發展凸出之斷層崖。

Li et al. (2010) 整理映秀－北川斷層沿線地表變形觀察點，彙整出五種變形特徵(圖 2-1-5)，並透過二維及三維展示斷層活動時上下盤的變形範圍，顯示同一斷

層作用下，斷層傾角與滑動面轉折對地表變形的影響。作者亦對部分觀察區域地表變形縮短量進行記錄，繪製如圖 2-1-6，可了解逆斷層錯動對上下盤之影響並不相同，上盤影響區域皆大於下盤，抬升量介於 1~6 公尺，影響範圍介於 8~30 公尺。

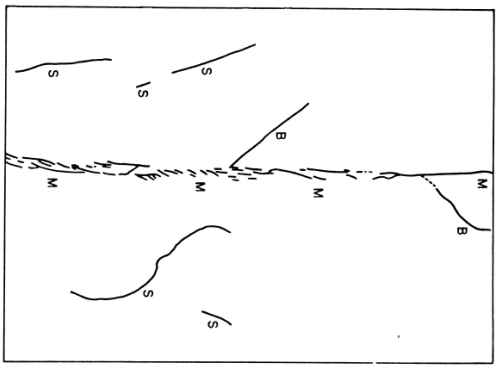


圖 2-1-1 活動斷層地表破裂跡的製圖型態 (Bonilla, 1982)

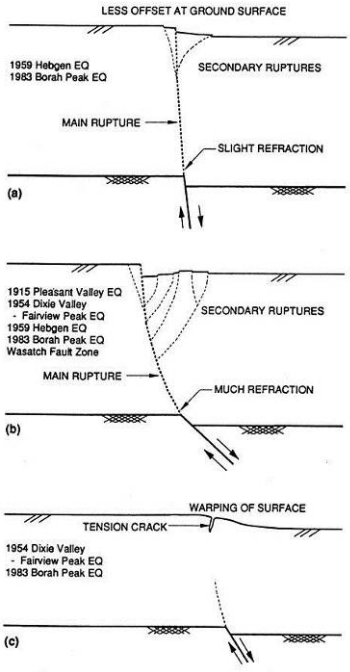


圖 2-1-2 正斷層引致之地盤變形分佈 (Bray et al. ,1994)

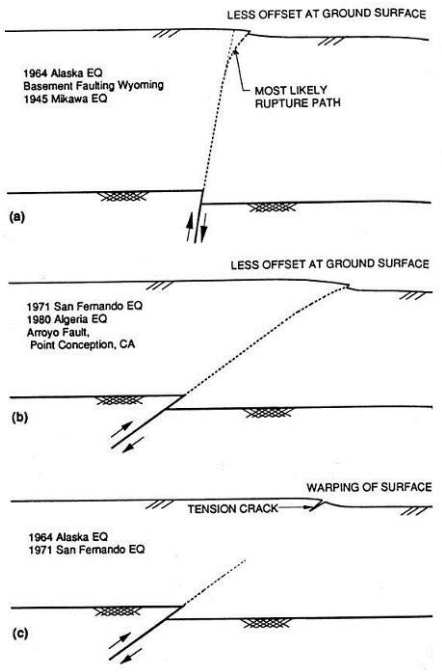


圖 2-1-3 逆斷層引致之地盤變形分佈 (Bray et al. ,1994)

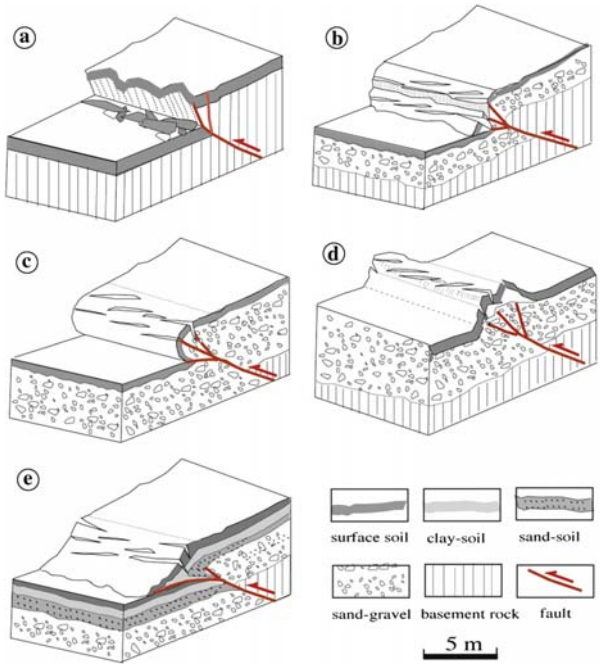


圖 2-1-4 汶川地震區域內不同覆土材料對地表變形特徵的影響 (Lin et al., 2009)

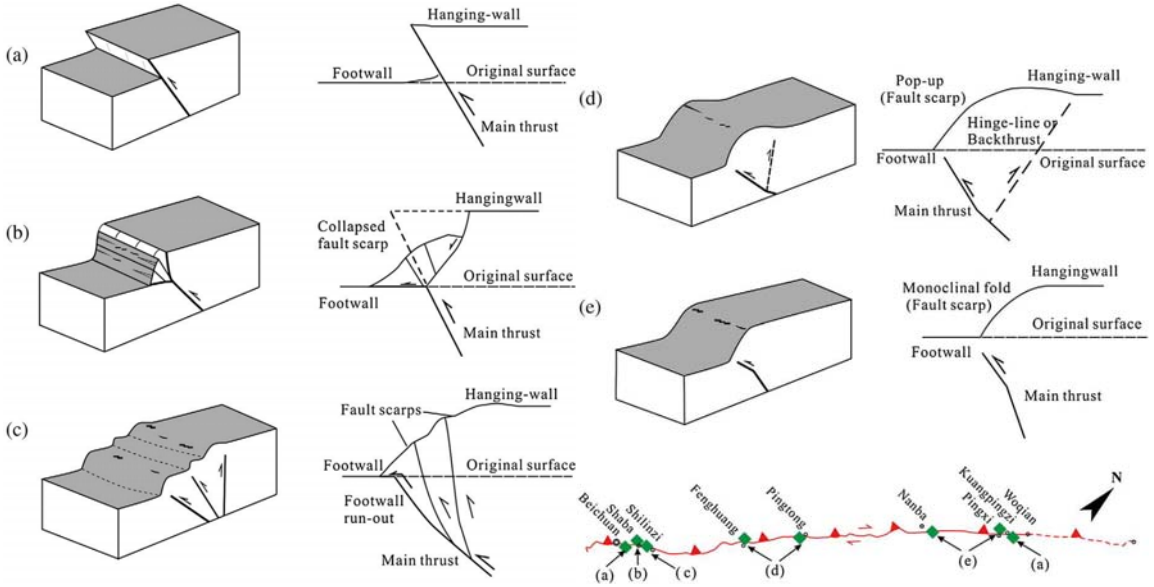


圖 2-1-5 映秀－北川斷層沿線的地盤二維及三維變形特徵之分類，圖右下方為各分類之露頭位置(Li et al., 2010)

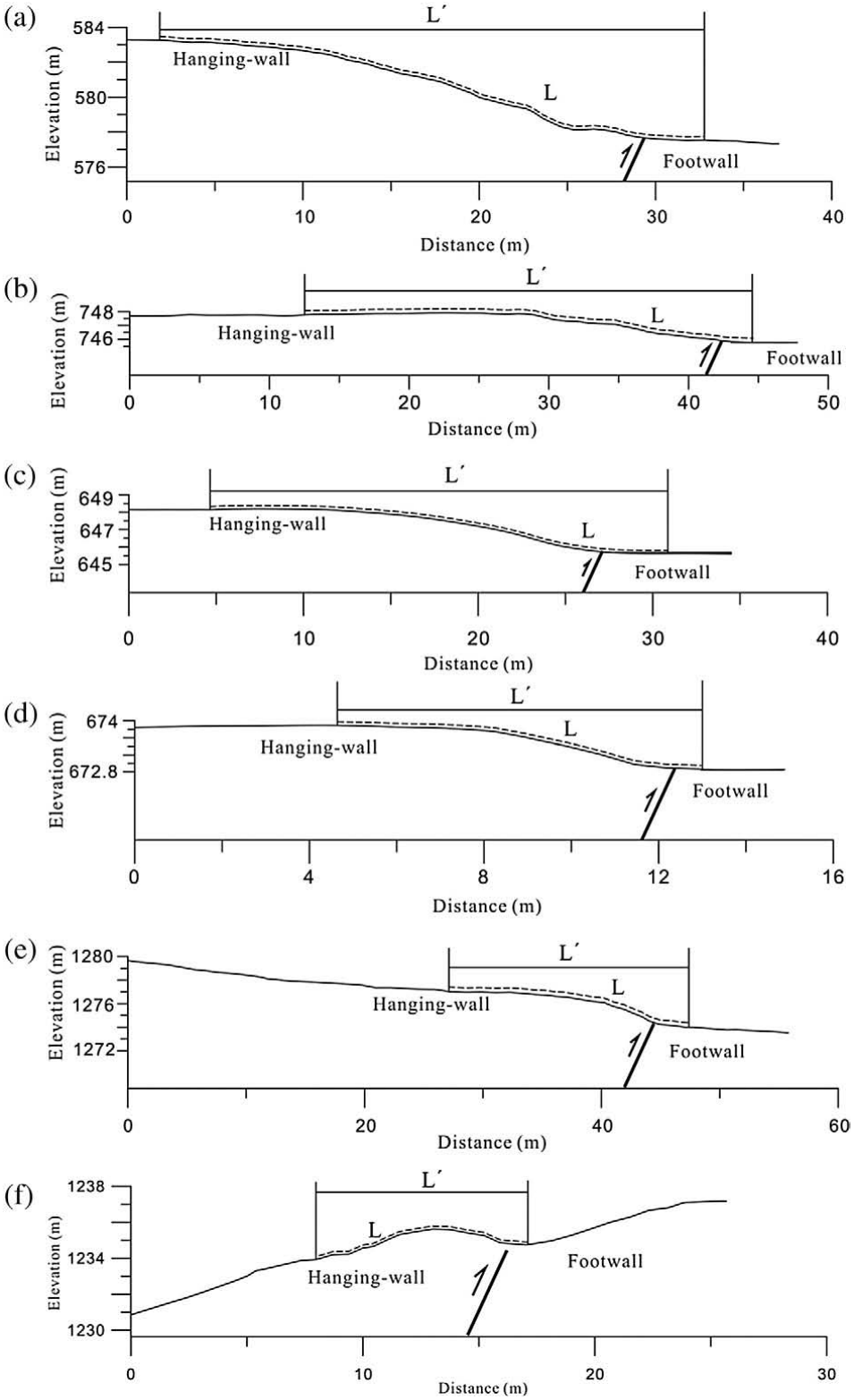


圖 2-1-6 映秀－北川斷層沿線的地表變形量 (a) Shilinzi; (b) Fenghuang; (c) Pingtong; (d) Nanba; (e) Pingxi; (f) kuangpingzi. (Li et al., 2010)

B. 國內案例

以本計畫規劃第一年的研究對象-車籠埔斷層為例，說明每一次災害性地震所產生之地震斷層及其所造成之近地表變形沿著地表斷層跡會有各種不同的變形型式。黃文正等人(2000)整理大甲溪至頭汴坑溪間車籠埔斷層的近地表變形形貌(圖2-1-7)，包括(a)單一斷層崖，斷面上具有擦痕，以埤豐橋東側大甲溪河床之斷層崖為代表；(b)兩道斷層崖，有時出現兩道斷層崖以大里溪河床之斷層崖為代表；(c)地表撓曲，未見斷層崖出露，出現二組張裂縫，一組平行撓曲崖，一組垂直撓曲軸，以中等教師研習會旁水稻田之伸張裂隙為代表；d)地表撓曲，並有雁行排列之伸張裂隙，指示具有左移或右移分量，豐原中正公園一號橋南端的變形即具左移分量；(e)地表隆升成地壘狀，兩側皆有撓曲崖，以豐原中正公園為代表；(f)地表出現階梯狀隆升崖及伸張裂隙以大里溪河床沖積層上之檳榔園為代表；(g)數道不平行之隆升崖；(h)撓曲崖上岩體翻倒，地表突然隆升加上重力作用，造成撓曲崖上岩體翻倒；(i)僅有一道或數道平行之隆升崖。

根據李錫堤等人整理，車籠埔斷層沿線的地盤變形，其變形範圍少者數公尺，多則數十公尺寬；少數特例更達數百公尺到超過一公里之情形。在變形帶內，地盤拱彎、傾斜，產生分支斷層及張裂縫，有時更有背衝斷層出現，如圖2-1-8 所示，地盤變形現象大致可分為九類，包括純逆衝變形、單斜褶皺變形、純拱彎變形，逆衝及拱彎變形、逆衝拱彎及地塹變形、拱彎及正斷層變形、逆衝及背扭褶變形、逆衝及背衝斷層變形、及逆衝及多張裂帶變形等。一般而言，純逆衝及純拱彎的變形現象較為單純，變形帶也較窄；逆衝及拱彎變形次之；餘各類則屬較複雜之變形，變形帶也較寬(李錫堤等人，2000)。Kelson et al.(2001) 整理了近地表變形的五種模式與變形範圍示意圖，如圖 2-1-9 所示，值得一提的是其五種變形模式與範圍標示了地表建物可能受損的程度。由於本研究希望可以了解當土層受斷層岩盤錯動影響而變形時與地表結構物之互制行為，所以斷層砂箱實驗及數值模擬分析皆以圖 2-1-9 的結果為對象，又因為斷層岩盤之錯動面有可能有轉折或其他複雜的構造，為簡化問題，**本研究以圖 2-1-9(a)、(b)為模擬的對象。**

針對車籠埔斷層槽溝挖掘研究調查，中央地質調查所目前已進行9處挖溝資料(圖 2-1-10) (中央地調所，2001, Chen *et al.*, 2001、2004、2007；陳文山等人，2000a、2000b, Lin, *et al.*, 2007a、2007b)，根據其研究結果顯示，車籠埔斷層在集集地震事件，依近地表變形特色可以分三段，北段為石岡段，上盤位移方向約N30-40°W，屬於逆衝左移斷層作用，地表附近垂直位移量最大(3-9.5 公尺)，主要發生在錦水頁岩之中，主斷層破裂跡上下盤還有多道分枝或次生破裂跡; 中段草屯段(車籠埔段)，上盤位移方向約 N70-90°W，屬於逆衝斷層作用，地表附近垂直位移量最大(0.5-3 公尺)，上盤主要是錦水頁岩、下盤為礫石層; 南段大尖山段，上盤位移方向約 N50°E，屬於右移逆衝斷層作用，地表附近垂直位移量最大(0.2-1 公尺)，研究最少，上盤地層未有探討。

由挖溝所顯示的近地表斷層變形模式，每次大地震造成之地表破裂跡位置，視覆蓋在斷盤之上覆土層厚度而定，當上覆土層厚度越厚，材料性質越疏鬆，斷層出露地表位置的變動性愈大，此外，在逆斷層基盤之尖端，因為應力集中的關係，會有尖端破裂或圓潤化之現象。以竹山槽溝為例，根據 Chen *et al.*(2007)及Huang *et al.*(2006)的研究，槽溝的北牆剖面呈現以褶皺作用為主的構造，屬於斷層擴展褶皺構造(fault propagation fold)，剖面中沒有呈現一條主要的斷層。褶皺帶兩側的岩層尚保存良好的連續性，其中只有數條移動量不大的次要斷層。從剖面中量測地表的斷層面傾角度約為 32 度; 南牆剖面的變形，斷層兩側岩層被一主要的斷層截切，上盤的變形較小形成些微的褶皺，屬於斷層彎曲褶皺(fault bend fold)，從剖面中量測地表的斷層面傾角度約為 20-24 度; 利用鑽井所量測的斷層深度以及槽溝斷層的位置計算斷層的角度約 24 度。地表斷層角度與地下較深斷層角度的差異，可能斷層切穿至地表(自由度空間)時造成角度些微的變化 (中央地調所，2001, Chen *et. al.*, 2001、2004、2007；陳文山等人，2000a、2000b, Lin, *et al.*, 2007a、2007b)。

斷層作用具有重複性，隨斷層作用過程中，斷層尖端前緣之上覆土層之變形集中於三角剪切帶，三角剪切帶中可能還有應變集中帶，因此斷層作用過程會產

生主要斷層、次生斷層與背衝斷層現象。從南北牆的變異可知，即使像竹山溝這麼好的槽溝成果，斷層傾角、土層厚度、土層中的變形模式都無法一致，明確簡化成同一型式，也就是說，斷層作用過程斷層破裂跡之發展，受到斷層形式、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。因此研究規劃選定竹山槽溝及中正公園槽溝為現地變形特徵逆推分析的案例場址，進行新增之鑽孔調查分析與力學參數推求，建立地質土壤分層與工程力學性質分類間之關聯，再嘗試進行槽溝變形特徵之逆算分析，以期能更進一步了解活動斷層近地表變形之主控變因。

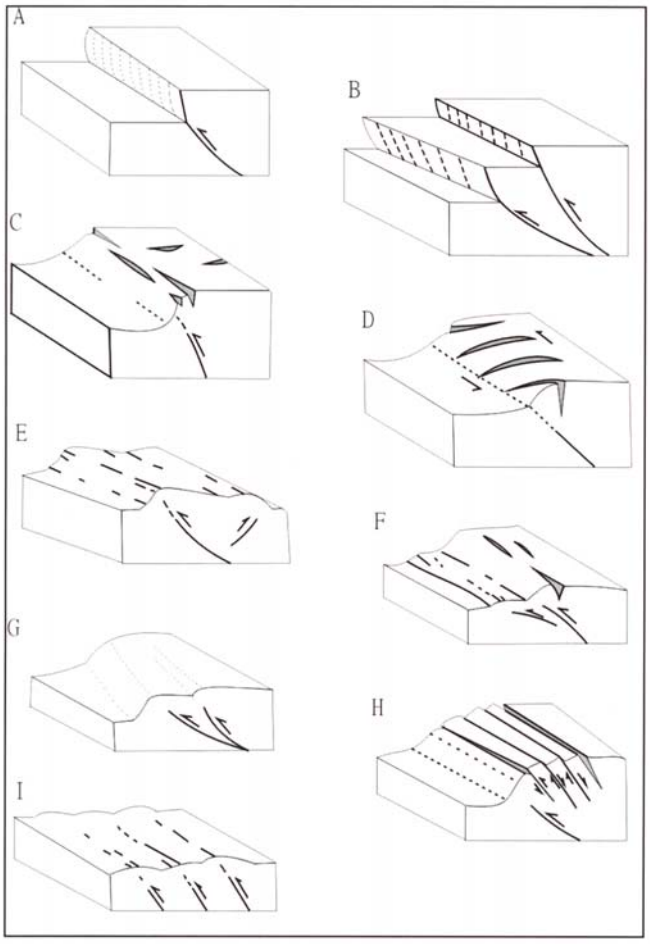


圖 2-1-7 車籠埔斷層地表破裂形貌(黃文正等人，2000)

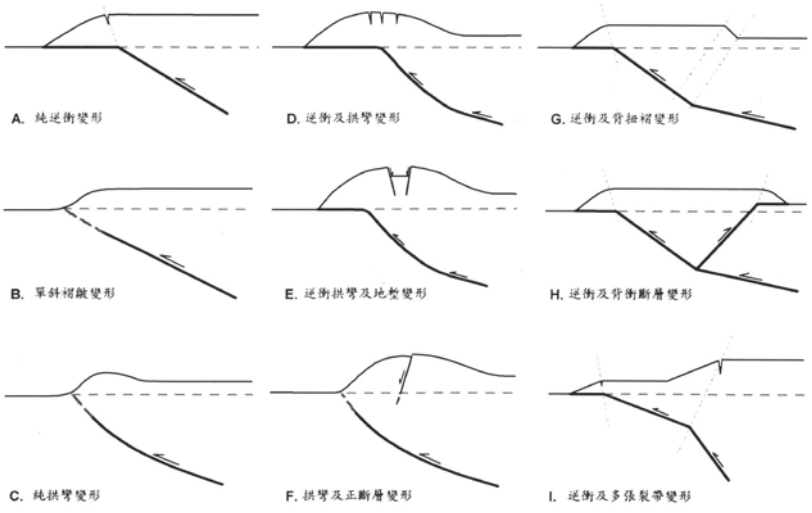


圖 2-1-8 車籠埔斷層沿線的地盤變形變形帶之分類(李錫堤等人，2000)

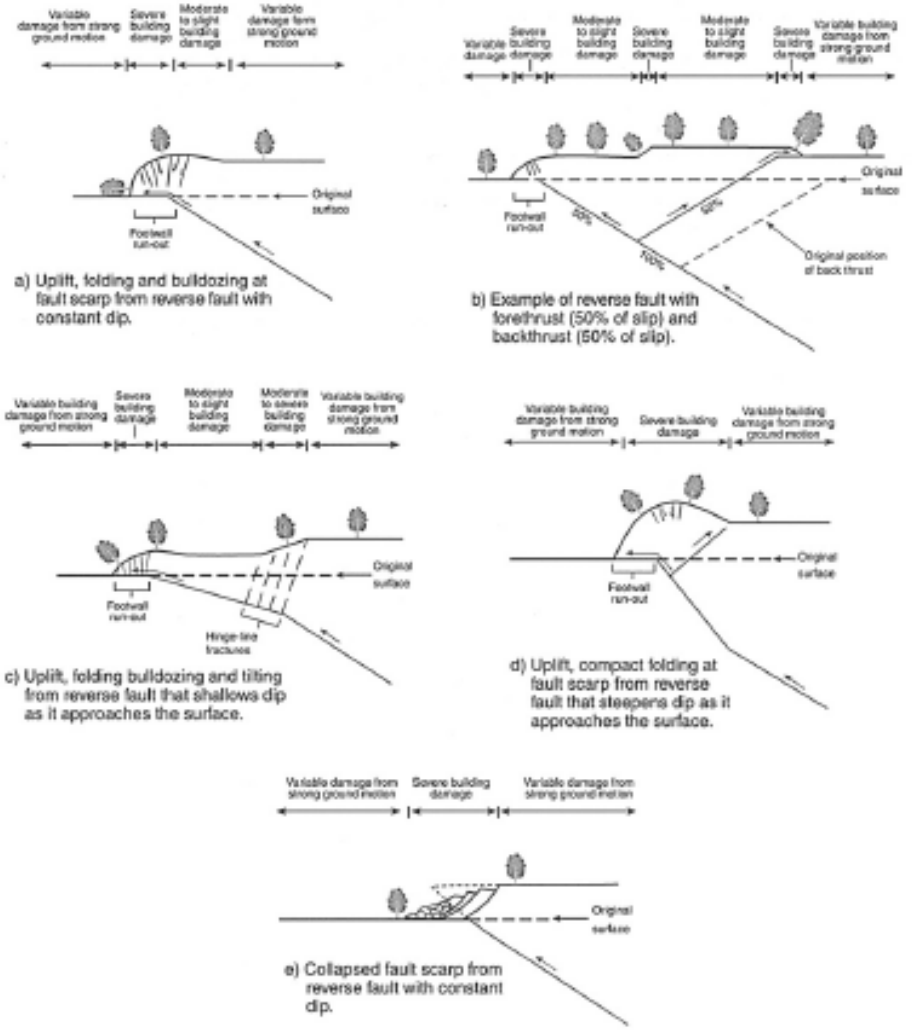


圖 2-1-9 集集地震車籠埔斷層近地表變形特性與變形影響範圍示意圖 (Kelson et al.,2001)

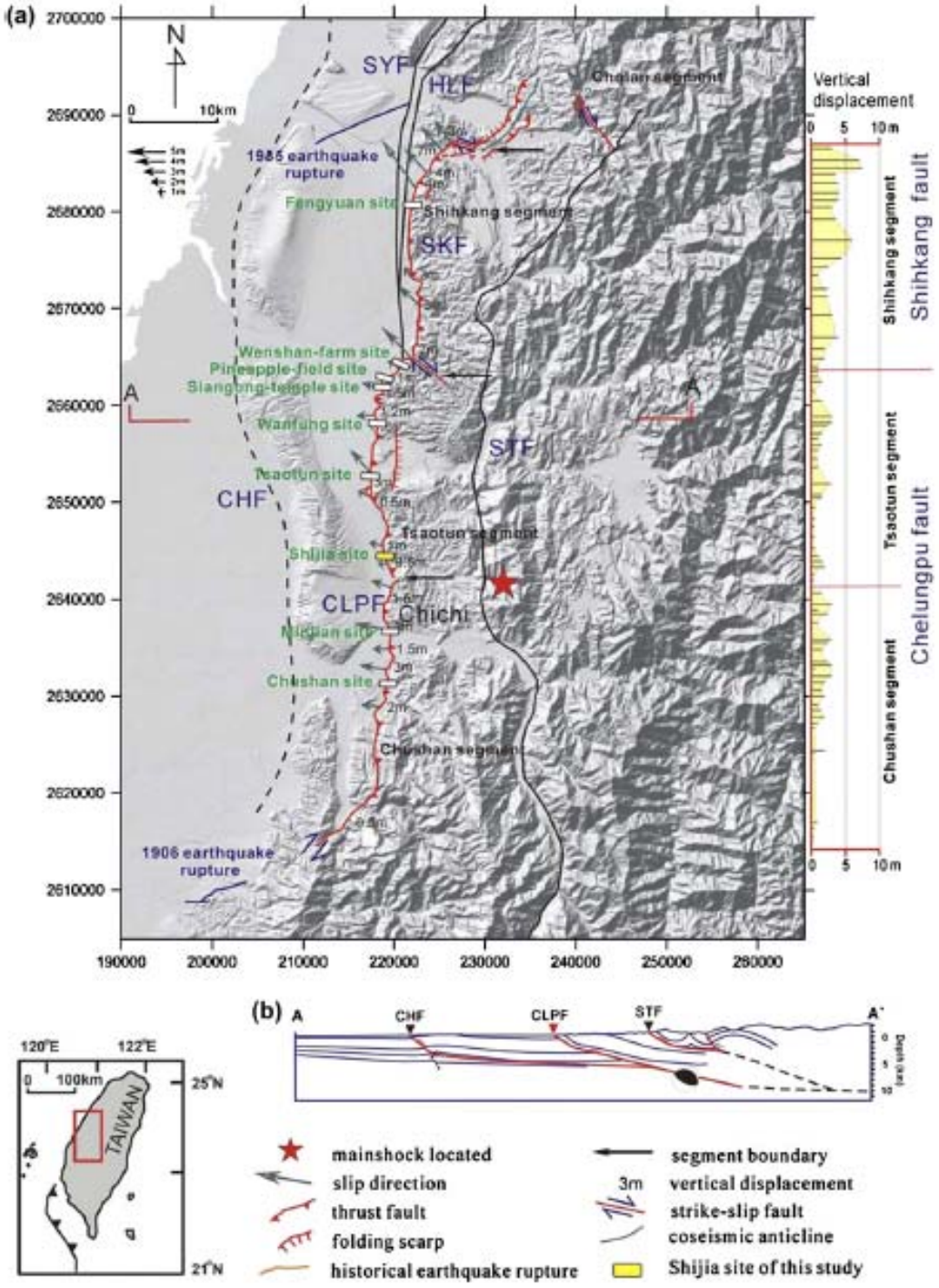


圖 2-1-10 車籠埔斷層之斷層分段、斷層面上滑移量、與挖溝位置圖 (Lin et al., 2007b)

2. 砂箱實驗

進行物理模型試驗 (1g 或離心模型) 的目的，是在控制的試驗條件下(包括土壤性質、邊界條件及受力條件)，藉由完整的量測數據，來探究原型(prototype)的破壞機制，並進而發展或評估數值模擬或分析方法的可靠性。因此模型試驗的成果，可以幫助分析者更了解研究問題的重要力學或破壞機制(Mechanism)，進而提出新的或改進的分析方法或概念。當然也可以利用試驗成果與數值分析的結果進行比較，來驗證目前數值分析程式對該研究問題的可用性。圖 2-2-1 說明此三種研究方法相輔相成，互相檢核印證及評估，才可以進行安全又合理的地工設計。

2-1 1g 模型試驗

以 1g 重力場之砂箱試驗方面，計有 Cole and Lade (1984)；Larzarte and Bray (1996) and Bray *et al.* (1994b)等。其中 Cole and Lade (1984)分別以無凝聚性之疏鬆砂、緊密砂作為上覆土層材料。在正、逆斷層時，在不同斷層傾角(dip angle)作用下，斷層面擴展路徑之實驗。並將實驗結果與極限平衡理論推導之斷層面軌跡比對。由逆斷層試驗結果，顯示：斷層面軌跡與水平方向之夾角，隨接近地表而由陡變緩之凹向下曲線，在接近地表之水平夾角為 45°-ϕ/2。斷層尖端擴展至地表與斷層初始尖端之水平距離為 0.98$\boldsymbol{H}$ (H 為上覆土層厚度；ϕ 為膨脹角)。當以對數螺旋線比對，其斷層面軌跡與斷層尖端擴展至地表之水平距離相似。

在利用砂箱模型，以離心機實驗給予重力場，以修正尺寸效應之研究，包含 Roth *et al.* (1981); Tani *et al.* (1994)等。此外，亦有併用 1g模型實驗外，並以離心機試驗進行比對 (Lee and Hamada, 2005; Bransby *et al.*, 2008a、2008b)。在砂土分別在疏鬆及緊密狀態下，在斷層滑移速度為 0.25 及 0.5 m/sec 下，模擬斷層滑移快及慢之狀態。其結果顯示，在緊密砂土狀態下，斷層帶範圍較疏鬆狀態之砂土寬；斷層滑動速度較快時，斷層帶範圍較疏鬆狀態之砂土窄 (Roth *et al.*, 1981)。

Lee *et al.* (2004)進行 1g 及離心模型試驗，1g 試驗結果顯示：(1)正斷層傾角對 W/H 比值的影響不大，而逆斷層的傾角愈小，W/H 愈大。(2)相反的逆斷層的傾角對

ΔH/H 值的影響不大，而正斷層的傾角愈大，ΔH/H 值愈大。(3)影響斷層跡出沒於地表的基盤錯動量ΔH/H，只跟砂土密度有關，愈鬆的砂斷層跡出沒地表所需的ΔH/H愈大，意味著愈鬆的砂能有效緩和斷層變位對地表的衝擊，而和斷層的種類無關。(4)上覆土層愈淺，W/H 的值愈大，較淺的覆土層厚度產生較大的影響範圍。Lee *et al.* (2004)據此推論：破裂面土層圍壓的大小會影響斷層跡發展的範圍，因此利用離心模型，在較大的圍壓下，來進行斷層錯動模型試驗有其必要性。綜合而言 Lee *et al.* (2004)認為影響斷層跡出沒範圍的因素包括：(1)斷層種類；(2)砂土密度；(3)試驗砂層的厚度，當模型覆土深度小於 40cm 時，1g 模型試驗的結果與離心模型差異甚大；(4)斷層傾角等因素。

Johansson & Konagai (2006)利用圓形活塞連接油壓設備，在乾砂及濕砂中，進行模擬斷層傾角為 90 度的 1g 模型試驗，試驗結果顯示斷層在濕砂發生錯動時，會有較大的錯動影響範圍，而且在較小的錯動距離下，就對周遭的構造物產生較大的影響。

魏勇帆(2006)進行室內 1g 砂箱試驗，試驗模型採用單一砂土層、單一黏土層及互層等配置，單一黏土層試驗主要目的在於探討黏土層於試驗過程中，受斷層錯動其剪切帶之發展演化趨勢、整體之變形行為與剪切帶發展至地表所形成之影響範圍，並與單一砂土層作一相互比較，探討兩者受斷層錯動時其變形、破壞行為之異同。互層試驗為砂土層在上層而粘土層在下層，土層厚度皆為 10cm，互層材料於試驗時其表現出來的變形趨勢、剪切帶之演變發展以及影響範圍等，其結果將與單一土層試驗做對照，並且進行討論比較。其結果顯示，均質砂土層其剪切帶乃隨著抬升量之增加，逐漸由斷盤錯動處往上發展至地表；均質黏土層其剪切帶由斷盤錯動處往上發展至一定抬升量時，其地表會產生開裂並牽引由斷盤向上發展之剪切帶，最後兩者相連在一起形成一條完整之剪裂面；互層中在抬升量到達 6cm 時有兩條剪切帶發展至地表，且互層中之黏土層並沒有剪切破裂產生，而是變形成為不對稱褶皺陡崖。地表影響範圍以均質砂土層最寬，互層影響範圍較小，判斷其原因可能由於互層中下層之黏土層相對於砂土層為較延性之材料，應變能較砂土層大，能吸收較多之變形，因此當斷盤錯動抬升時，黏土層受到外力作用其內部應力重新分配，這時因外力所產生之變形會由一部分被黏土層吸收掉，其他再傳遞到砂土層而產生剪切帶，黏土層產生類似消能的作用，因此使得砂土層受到之外力作用減少，導致剪切帶到達地表所形成之影響範圍減小。

在竹山槽溝及新城斷層的槽溝中都可以看到土層的分佈不是單一層的，而是多層，因此本研究在數值分析中也會對砂、黏土互層的狀況進行模擬，先以魏勇帆(2006)的砂箱實驗之研究結果為比對對象，再比對槽溝開挖看到的結果

鐘春富(2007)以 1g 重力場之砂箱進行逆斷層錯動時上覆土層與淺基礎之互制行為的實驗，並以數值分析軟體 ABAQUS 進行模擬來比對結果。由他的研究結果可以得到：當基礎接近剪切帶範圍內，會產生明顯互制之影響，如圖 2-1-2，可以看到淺基礎造成造成剪切帶範圍改變，使塑性應變帶造成轉向之現象，且有可能出現反向斷層(antithetic fault)。當基礎座落剪切帶範圍時， 其互制現象最明顯， 將造成且剪切帶產生分支之現象。但在此研究中使用的 ABAQUS 裡是用網格來進行模擬，其中最大的缺點就是網格無法分離，否則程式運算就會發散而終止，因此本研究使用分離元素法模擬軟體 PFC 來進行模擬。

2-2 離心模型

Stone & Wood (1992)進行砂層中的 1g 模型及 100g 垂直正斷層模型試驗，認為錯動面位移與砂土的顆粒尺寸的比值會影響破裂面的型態以及影響斷層跡的發展；另外砂土的膨脹角及摩擦角，均受到覆土應力大小的影響，因此利用小模型的結果推測到現場大尺寸的結果，應該考慮這些因素。Moosavi et al. (2010)整理 Stone & Wood (1992)的試驗成果繪製成圖 2-2-3，說明 1g 模型及 100g 模型試驗，垂直正斷層錯動所造成上覆土層破裂跡之比較。Moosavi et al. (2010)認為 1g 模型及 100g 模型試驗的破裂跡型態相當類似，但受到滑動面砂土膨脹角的不同，1g 模型試驗沿斷層面會發生較多道的破裂面。Tani et al. (1996) 進行 1g 垂直斷層模型試驗，其錯動位移從 5 公分到 200 公分不等。他們認為破裂跡傳到地表所需的底層錯動量和覆土層厚度呈現非線性的關係，覆土層厚度少於 20 公分，會有較少的破裂面，較大型的模型其破裂型態較為複雜。另外覆土層厚度與顆粒尺寸的比值必須大於一個臨界值後，則斷層破裂型態漸趨一致。

英國 University of Dundee 的研究人員，在 115g 的離心加速度場中，利用砂土進行一系列正斷層或逆斷層錯動的乾砂離心模型試驗，斷層傾角 60 度，該系列試驗並探討斷層錯動與淺基礎的互制反應(Bransby, et al. 2008[a]；Bransby, et al. 2008[b])。圖

2-2-4 為 Dundee 大學的斷層錯動模擬離心模型試驗箱(container) ，該試驗箱利用油壓千斤頂驅動，造成正斷層或逆斷層的錯動，最大錯動位移可達 3.04 公尺(原型尺寸)。利用 LVDT 量測地表變位，另外由壓克力視窗利用照相，並利用 PIV 來估計地盤變位向量及計算破裂面附近的應變場。

劉守華等人(2005)利用四種不同種類的上覆土層，分別在 150g 模擬垂直正斷層(斷層傾角 90 度)及在 100g 模擬平移斷層所造成上覆土層破裂情形，最大原型錯動量 3.0 公尺~4.5 公尺。研究成果顯示上覆土層受正斷層的影響較水平平移斷層來的大，不同種類的覆土層破裂型態也不同。

綜合 1g 及離心模型試驗的研究成果，影響上覆土層斷層跡發展及出露地表的因素，可歸納如下。斷層構造的影響包括：(1)斷層種類：正斷層、逆斷層或平移斷層；(2)斷層傾角及斷層錯位量的大小；(3)基盤頂升的速率。而上覆土層的影響則包括：(1)土層種類(砂土或黏土、乾砂或濕砂)及不同的工程性質(土壤楊氏模數、土壤柏松比等)；(2)土層的凝聚力、摩擦角及膨脹角的大小；(3)上覆土層的厚度。除了上述諸因素外，從學理上基盤的粗糙度(roughness)、基盤的型態及上覆土層超載(surcharge) 的大小，也會影響上覆土層斷層跡發展及出露地表的不同。

利用相似模擬來研究物理現象以幫助解決理論與設計問題是工程上常用的原則，使用與原型（prototype）相同的材料且在與原型相同應力及邊界條件下進行模型試驗，更可以反映出原型的力學行為。而重力是土工結構設施最主要的受力變形、破壞因素。因此將 1/N 縮尺模型放置於 N 倍地球重力加速度的環境中，使模型材料加重 N 倍，則可以將模型中每點的自重應力提高到與原型中相對應點之應力，相似性提高，模型就可以表現出原型之受力行為。而離心力是一種穩定且容易控制的人造重力場，所以離心機是提供人造重力場最方便且最穩定可靠的裝置。圖 2-2-5 是離心模型試驗、1g 模型試驗以及原型的相互關係，圖中顯示原型與離心模型相對應深度處，兩者覆土應力相同。因此利用 1/N 縮尺離心模型在 N 倍重力加速度的離心力場進行模型試驗，可以在與現場完全相同的應力條件下重現現場的物理現象，這個優點是無法利用 1g 縮尺模型試驗得到的。表 2-2-1 為離心模型

與原型之相似性，表中顯示離心模型與原型在對應點有相同的應力及應變，離心模型與原型相似性高，這是離心模型試驗的優點。

■ **離心模型試驗的因次分析**

圖 2-2-6 為二維土壩原型與二維離心土壩模型從力平衡方程式的比較。式(2-1)為土壩原型內任一 A 點的力平衡方程式，

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}=0$$
$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial \sigma_y}{\partial y}-\rho g=0 \qquad (2\text{-}1)$$

而式(2-2)為 1/N 縮尺離心模型，在 Ng 的離心力場時，與原型相對應 A 點的力平衡方程式。

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial (x/N)}+\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial (y/N)}=0$$
$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial (x/N)}+\frac{\partial \sigma_y}{\partial (y/N)}-\rho N g=0 \qquad (2\text{-}2)$$

經過簡化後，式(2-1)跟式(2-2)完全相同，因此若原型與模型均由相同材料所構成，且邊境條件相同，則兩者擁有相同的解析解。

利用離心機進行縮尺模型試驗，使用原型相同的材料製作模型，可以使模型在與原型完全相同的強度和勁度性質以及應力條件下進行試驗。令模型應力縮尺比，σ^*

$$\sigma^*=\frac{\sigma_m}{\sigma_p} \qquad (2\text{-}3)$$

模型長度縮尺比，L^*

$$L^*=\frac{L_m}{L_p}=\frac{1}{N} \qquad (2\text{-}4)$$

本節中下標 m 及 p 分別代表模型及原型尺度；而上標 * 則代表不同尺度的縮尺比(scale factor)。下面就 1/N 縮尺的離心模型，進行靜態試驗的因次分析進行討論。令原型任一點的應力與模型對應點的應力相同，則應力縮尺比

$$\sigma^*=\frac{\sigma_m}{\sigma_p}=\frac{\rho_m g_m h_m}{\rho_p g_p h_p}=\rho^* g^* h^*=1 \qquad (2\text{-}5)$$

其中，σ=有效覆土應力；ρ=土壤密度；h=覆土深度；g=重力加速度。而 $h^* = h_m / h_p$；$g^* = g_m / g_p$；$\rho^* = \rho_m / \rho_p$。若使用相同材料進行模型試驗時，則

$$\rho^* = \frac{\rho_m}{\rho_p} = 1 \qquad (2\text{-}6)$$

因為 1/N 縮尺的離心模型 $h^* = L^*$，所以 式(2-5)可寫成

$$g^* = \frac{\sigma^*}{\rho^* L^*} = \frac{1}{L^*} = N \qquad (2\text{-}7)$$

因此重力加速度的縮尺比等於 N，代表試驗在 Ng 的人造重力場中進行試驗，即可達到原型及 1/N 縮尺模型在對應點處可以有相同的應力條件。

考慮原型與離心模型內孔隙水壓的流動或消散問題，如圖 2-2-6 所示，原型與離心模型任意兩相對應點的距離分別為 L_p 及 L_m，令土壤孔隙水的流動速度分別為 v_p 及 v_m，則原型與模型中孔隙水流經該段距離所需的時間 t_p 及 t_m 為：

$$t_p = L_p / v_p \qquad (2\text{-}8a)$$

$$t_m = L_m / v_m \qquad (2\text{-}8b)$$

當模型採用和原型相同的土壤材料，土壤的滲透係數相同，即 $k_m=k_p$，則原型與模型內孔隙水的流速分別為：

$$v_p = k_p i_p = k(h_p / L_p) \qquad (2\text{-}9a)$$

$$v_m = k_m i_m = k(h_m / L_m) \qquad (2\text{-}9b)$$

模型與原型相對應點具有相同的總水頭，即 $h_p=h_m$，而 $L_m=L_p/N$，故 $i_m=Ni_p$，代入式(2-9)可得 $v_m=Nv_p$；再代入式(2-8)便可建立孔隙水於縮尺模型和原型中流動所需時間的關係：

$$t_m = \frac{\Delta L_m}{v_m} = \left(\frac{\Delta L_p}{N}\right)\left(\frac{1}{N v_p}\right) = \frac{1}{N^2} t_p \qquad (2\text{-}10)$$

所以有關土體內孔隙水流動之滲流或壓密問題，在模型中所需的時間是原型的 $1/N^2$。因此將離心模型置於離心力場中飛行數天，便可模擬現場原型耗時數十年的壓密行為或污染擴散的問題。

由前面離心模型試驗的討論，提高試驗階段的重力加速度至**Ng**，就可達到縮尺模型內任一點的應力與原型對應點應力相同的條件，這樣就可以達到原型與模型進行試驗時應力相似的條件。因此本研究選用離心機作為本研究最重要的試驗工具，利用離心模型試驗可以模擬現場應力之優點，在80g的離心加速度場下，本計畫利用砂質地盤進行 1/80 縮尺的斷層錯動離心模型試驗，來探討斷層錯動時，上覆土層斷層痕跡的發展和演化現象，以及斷層痕跡對不同型式基礎衝擊的影響程度。

表 2-2-1 離心模型與原型之相似性比較

物理量	單位	因次比(離心模型/原型)
加速度(acceleration)	m/sec^2	N
長度 (linear dimension)	m	1/N
應力 (stress)	kPa	1
應變 (strain)	-	1
密度 (density)	kg/cm^3	1
質量或體積(Mass or volume)	kg or m^3	$1/N^3$
單位重 (unit weight)	N/m^3	N
力 (force)	N	$1/N^2$
彎矩(Bending moment)	Nm	$1/N^3$
Bending moment/unit width	Nm/m	$1/N^2$
Flexural stiffness/unit width (EI/m)	Nm^2/m	$1/N^3$
壓密時間(time: diffuse)	s	$1/N^2$
時間(time: dynamic)	s	1/N
頻率(frequency)	1/s	N

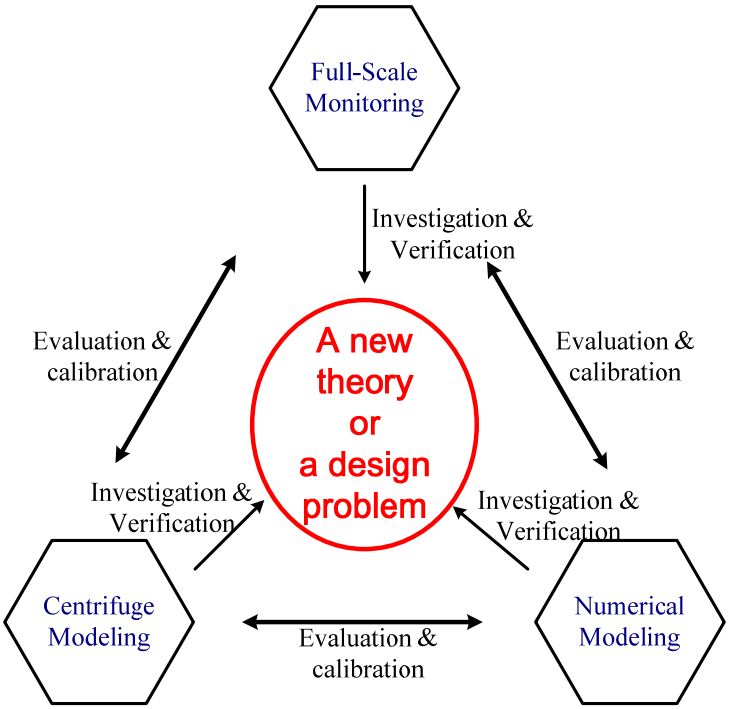
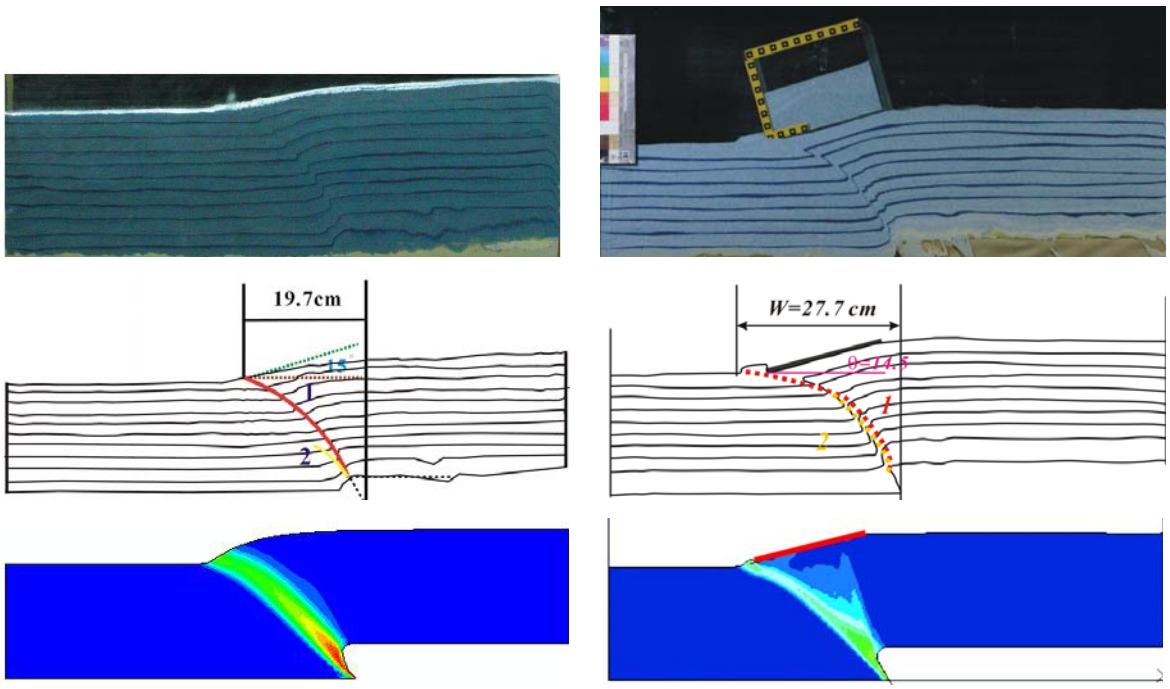


圖 2-2-1 離心模型、數值或分析模型及現場全尺度試驗相互關係



(a)剪切帶內無淺基礎之自由場實驗　　(b)剪切帶內有淺基礎

圖 2-2-2 斷盤錯動時上覆土層與淺基礎之互制行為(鐘春富，2007)

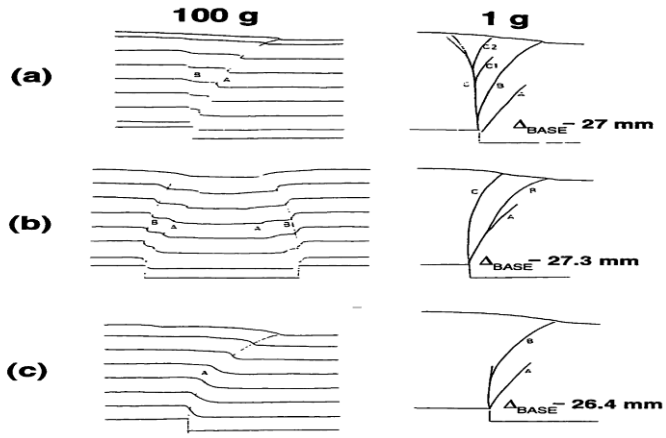


圖 2-2-3 1g 模型及 100g 模型試驗，垂直正斷層錯動破裂跡之比較 (摘自 Moosavi et al. 2010)

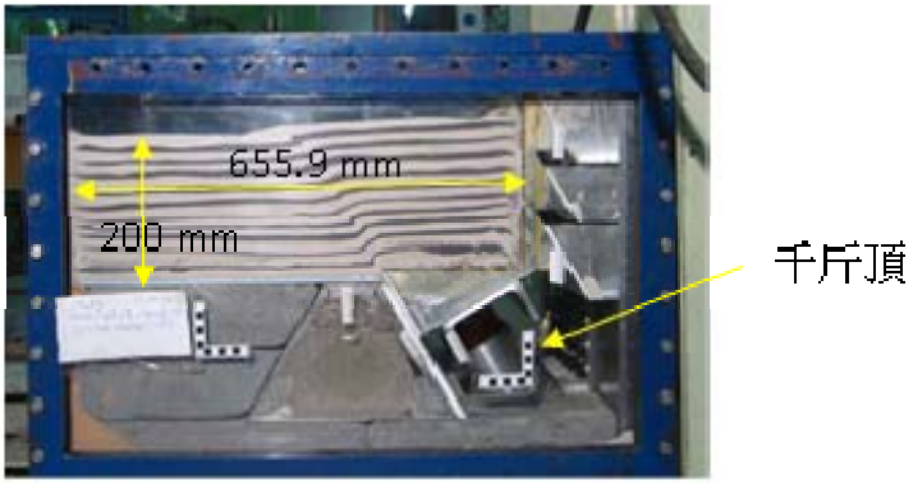


圖 2-2-4 英國 Dundee 大學油壓千斤頂驅動的斷層模擬離心模型試驗箱 (摘自 Bransby, et al. 2008[a]；Bransby, et al. 2008[b])

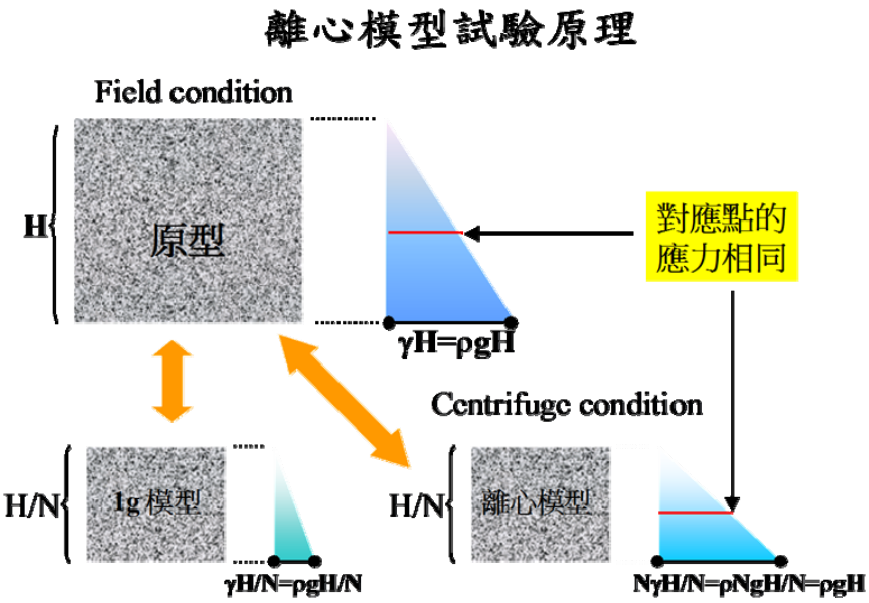


圖 2-2-5 原型、1g 模型與離心模型不同深度處對應點覆土應力之比較

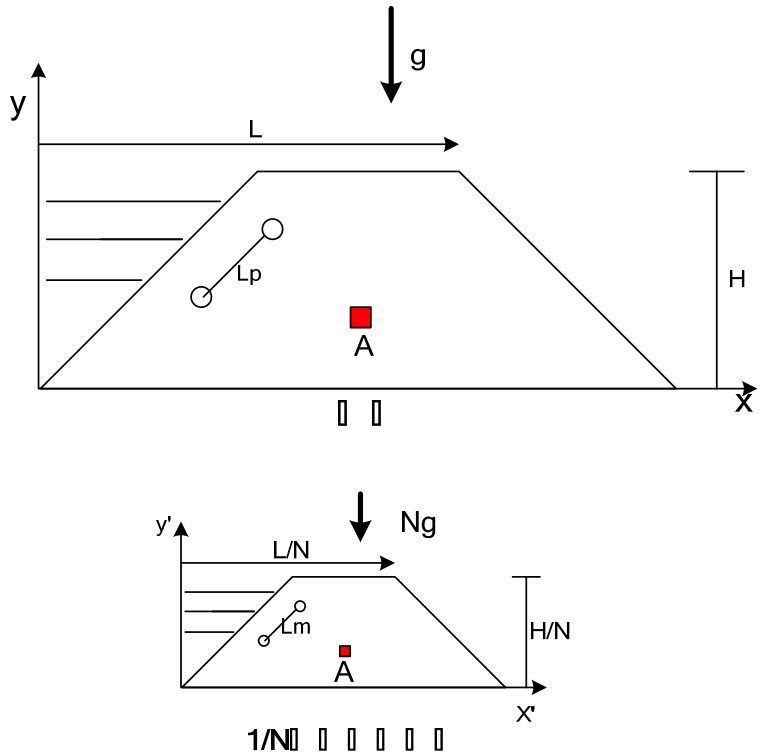


圖 2-2-6 土壩原型與 1/N 縮尺離心土壩模型

3. 數值分析

數值分析方面計有使用有限元素、有限差分法及離散元素法進行分析。為模擬傾向滑移斷層 (dip-slip fault)，對上覆黏土層之變形行為與應力分布情形，以使用有限元素法(***FEM***)分析土壤在不同彈性參數(***E***，ϕ)下，地表產生剪切帶所需之斷層錯動量大小，作為評估選址之參考 (Scott and Schoustra; 1974, Bray *et al*., 1994b)。

使用有限差分法之數值分析方面，文獻顯示在逆斷層之斷層傾角 45°時，探討土壤在緊密與疏鬆狀態下，斷層滑移速度快與慢之情形，對上覆土層變形帶之發展距離，並與物理模型實驗結果比對，其結果顯示，在緊密砂土狀態下，上覆土層變形區發展距離較疏鬆狀態之砂土窄；斷層滑動速度較快時，上覆土層變形區發展距離亦較疏鬆狀態之砂土窄 (Roth *et al*., 1982)。

4. 斷層活動對位於上覆土層中人工結構物影響之研究

當斷層作用引致上覆土層變形，當建築物基礎位於此變形帶附近會有明顯之互制現象。當基礎強度較基礎下方土壤高時，其周圍土壤會與基礎分離，但建築物會保持完整，或僅有剛體位移。如基礎強度較低，則基礎會產生剪切破壞，造成建築物的破壞。針對斷層作用引致上覆土層變形行為對地表建築物影響之研究，將目前國內、外相關之研究，整理如表 2-4-1 所示。

針對斷層錯動引致上覆土層變形行為，對地下隧道影響之研究。將目前國內、外相關之研究，整理如表 2-4-2 所示。

表 2-4-1 斷層作用引致上覆土層變形行為對建築物影響之文獻摘錄

方法	斷層形式	上覆土層材料	結構形式	土壤與結構互制/土壤/結構行為
現地調查				
Sherard *et al*. (1974)	正/逆斷層	土壤	壩體	-
Lazarte *et al*. (1994)	平滑斷層	土壤	基礎	-
Lettis *et al*. (2000)	平滑斷層	土壤	建築物	
Murbach *et al*. (1999)	平移斷層	土壤	基礎, 高壓電塔	-
Bray (2001)	正/逆斷層	土壤	建築物、壩體、橋樑	-
Ulusay *et al.* (2001)	平滑斷層	土壤	建築物、橋樑、隧道	-
Kelson *et al*. (2001)	逆斷層	土壤	橋樑	-
Kung *et al*. (2001)	逆斷層	土壤	壩體	-
Dong *et al*. (2003)	逆斷層	土壤	建築物	-
Donmez and Pujol (2005)	平滑斷層	土壤	建築物	-
Konagai (2005)	平滑/正斷層	土壤	基礎	-
Anastasopoulos (2005)	正斷層	土壤	建築物	-
Bray and Kelson (2006)	平滑斷層	土壤	建築物、土堤	-
物理模型實驗				
Bray (1990)	逆斷層	黏土	土堤	-
Lazarte (1996)	平滑斷層	黏土	土堤	-
Nahas *et al.* (2005)	正斷層	砂土	基礎	-
數值分析				
Duncan and Lefebvre (1973)	平滑斷層	固定外力	核電廠	無/彈塑性/彈性
Bray (1990)	正/逆斷層	黏土	土堤	/彈性/彈塑性

Lazarte (1996)	平滑斷層	黏土	土堤	有/彈塑性/彈塑性
Kawashima (2002)	逆斷層	梁-彈簧	橋樑基礎	有/彈性/彈塑性
Anastasopoulos (2005)	正斷層	土壤	建築物	有/彈性/彈塑性
Yilmaz and Paolucci (2007)	正/逆斷層	不排水土壤	基礎	有/彈塑性/彈性

表 2-4-2 斷層作用引致上覆土層變形行為對地下結構物影響文獻摘錄

方法	**斷層形式**	**上覆土層材料**	**結構形式**	**變形形式**	**土壤與結構互制/土壤/結構行為**
現地調查					
Bonilla. (1982)	正/逆斷層	土壤	維生管線	-	-
O'Rourke and Palmer (1996)	平滑斷層	土壤	維生管線	縱向	-
Prentice and Ponti (1997)	正/逆斷層	土壤	隧道	縱向	-
Ulusay *et al*. (2001)	平滑斷層	土壤	隧道	縱向	-
Takada *et al*. (2001)	逆斷層	土壤	維生管線	橫向斷面及縱向	-
Cluff *et al*. (2003)	平滑斷層	土壤	維生管線	縱向	-
Sorensen *et al*. (2003)	平滑斷層	土壤	維生管線	縱向	-
Kontogianni and Stiros (2003)	平移/逆斷層	土壤	隧道	縱向	-
Honegger *et al*. (2004)	平移斷層	土壤	維生管線	縱向	-
Konagai (2005)	平移/正斷層	土壤	隧道、基礎	橫向斷面	-
物理模型實驗					
Burridge *et al*. (1989)	逆斷層	砂土	隧道	縱向	-
Trautmann and O'Rourke (1985)	平滑斷層	砂土	基礎	-	-
Trautmann *et al*. (1985)	平滑斷層	砂土	壩體	-	-

數值分析					
Newmark and Hall (1976)	平滑斷層	梁-彈簧	維生管線	縱向	有/彈性/彈塑性
Kennedy *et al*. (1977)	平滑斷層	梁-彈簧	維生管線	縱向	有/彈性/彈塑性
Wang and Yeh (1985)	平滑斷層	梁-彈簧	維生管線	縱向	有/彈性/彈塑性
Takada *et al.* (2001)	逆斷層	梁-彈簧	維生管線	橫向斷面及縱向	有/彈性/彈塑性
Kawashima (2002)	逆斷層	梁-彈簧	橋樑基礎	縱向	有/彈性/彈塑性
Karamitros *et al*. (2007)	平滑斷層	梁-彈簧	維生管線	縱向	有/彈塑性/彈性
Burridge *et al*., (1989)	逆斷層	砂土	隧道	縱向	-

5. 研究方法之限制與比較

總結本章所提到之研究方法，包含現地調查、砂箱實驗及數值分析，其研究結果之限制及三種方法使用上之比較(表 2-5-1)。

表 2-5-1 研究方法之限制與三種方法使用上之比較

研究方法	限制與比較之描述
現地調查	現地調查之地表變形、地質現象、災害狀況等觀察結果為真實結果，不論是砂箱實驗或數值分析皆以現地調查之結果為依據或模擬對象。惟由於在野外清楚而具代表性之露頭不易尋覓，且地形之變化亦僅限於瞭解接近地表處之地層變形行為，無法得知地層剖面不同深度處之地盤破裂變形行為。
砂箱實驗	其優點為可以在室內進行實驗，可以控制變因、並可重複實驗，但為受限於實驗場地及實驗之可行性，往往必需將問題簡化，因此與現地所發生的狀況仍有出入。
數值分析	1. 邊界元素法：可以看到地表的變形範圍，但無法看到覆土層裡垂直向的變形範圍。 2. 有限差分法：由網格之變形可以準確的計算應變量。邊界條件使用巨觀參數即可，可以直接輸入試驗室量到之數據。但由於網格為不可分離的連續單元，無法解決破裂、滾動等問題。運算過程中易發散。 3. 分離元素法：顆粒為分離的獨立單元，可以有相對位移、滑動、滾動。並可以觀察顆粒分離、鍵結斷裂之現像。運算過程中不易發散。但因為沒有網格，無法計算應變。邊界條件需要輸入微觀參數，與現地可以量測到的巨觀參數之間還沒有完整的轉換公式。

第三章、計畫成果

1999 年九二一集集地震所導致的災害，使得活斷層行經之人工建築禁限建問題成為公眾討論的主題，蔡承璋(2003)統計車籠埔斷層跡行經之都市計畫區計有十三個：卓蘭、東勢、石岡水壩特定區、豐原、台中市(大坑地區)、太平、霧峰、草屯、中興新村、南投、名間、竹山（延平地區）等都市計畫區，其需要重新鑑界、複丈與地籍圖重測的土地筆數就高達十一萬筆以上，而斷層帶附近，位於破裂帶上建物幾乎全毀，附近建物受損情況極為嚴重，其中建物以屬加強磚造之透天厝建築與老舊土厝損毀為數最多。

國科會於 1999 年完成五千分之一車籠埔斷層線調查圖後，於同年檢送暫時禁建範圍圖，依照建築法第四十七條發佈暫時禁建至 1999 年年底，其禁建範圍為斷層帶兩側各五十公尺。在 1999 年 12 月底，在完成都市計畫區內車籠埔斷層帶一千分之一測量地形圖後，行政院災後重建委員會公布「近車籠埔斷層地區永久禁限建計畫」頒佈都市計畫區禁限建計畫，規範車籠埔斷層帶兩側各十五公尺為禁限建範圍以及活動斷層帶不明確地區的西側（下盤）30 公尺、東側（上盤）50 公尺範圍劃為永久禁限建區。非都市土地部分則是以五千分之一車籠埔斷層線調查圖，依照實施區域計畫地區建築管理辦法來實施禁限建，而公告之禁建範圍為活動斷層線兩側各 15 公尺範圍之內的帶狀地區(蔡承璋，2003)。其管制原則如下：

1. 公有建築物禁止興建，若現有公有建築經補強安全無慮後，仍可繼續使用。

2. 私有建築物高度不超過兩層樓，簷高不超過七公尺，得特許興建，並限作為自用農舍或住宅使用。

3. 其他活動斷層帶未明確的地區，經詳細地質調查過後確定其斷層經過明確位置，得比照活動斷層帶明確地區之禁建範圍。

而其他法令對鄰近活動斷層跡之土地開發亦有相關規定，如表 3-1(蔡承璋，2003)，唯斷層引致地表破裂並非單一線形，斷層類型、活動型態、上覆土層特性等皆會影響地表變形，進而對地表建物或地下維生管線造成影響，本研究亦試圖從現地

調查、室內試驗及數值模擬等不同角度，了解其地表變形特性。

表 3-1 我國有關活動斷層之土地管理法規整理(蔡承璋，2003)

<table>
<tr><th>法規名稱</th><th>條文內容</th><th>說明</th></tr>
<tr><td>建築法</td><td>第 47 條規定：「易受海潮、海嘯侵襲，洪水泛濫及土地崩塌之地區，如無確保安全之防護設施者，直轄市、縣(市)主管建築機關應商同有關機關劃定範圍予以發布，並豎立標誌，禁止在該地區範圍內建築。」</td><td>間接規定活動斷層不得建築</td></tr>
<tr><td>山坡地保育利用條例</td><td>第 7 條：「依前條劃定之使用區及編定之使用地，縣市政府每五年應通盤檢討一次，並得視實際需要變更之…。 」
第 15 條：「山坡地之開發利用，致有發生災害或公共設施之虞者，主管機關應予限制…」</td><td>主管機關應時對於山坡地通盤檢討其限制</td></tr>
<tr><td>山坡地開發建築管理辦法</td><td>第 5 條：「山坡地有下列各款情形之一者，不得開發建築：(1) 坡度陡峭者。(2) 地質結構不良、地層破碎、活動斷層或順向坡有滑動之虞者。(3) 現有礦場、廢土堆、坑道，及其周圍有危害安全之虞者。(4) 河岸侵蝕或向源侵蝕有危及基地安全者。(5) 有崩塌或洪患之虞者。…. 」前項第 1 款至第 5 款之認定基準，由內政部於建築技術規則中定之。</td><td>規定活動斷層（位於山坡地）為不得開發建築</td></tr>
<tr><td>建築技術規則施工篇</td><td>第 13 章(山坡地建築)第 262 條中提及「山坡地有左列各款情形之一者，不得開發建築。……活動斷層：依歷史上最大地震規模 (M) 劃定在下表範圍內者：
<table>
<tr><th>歷史地震規模</th><th>不得開發建築範圍</th></tr>
<tr><td>M≧7</td><td>斷層帶二外側邊各一百公尺</td></tr>
<tr><td>7＞M≧6</td><td>斷層帶二外側邊各五十公尺</td></tr>
<tr><td>M＜6 或無記錄者</td><td>斷層帶二外側邊各三十公尺內</td></tr>
</table></td><td>規定活動斷層（位於山坡地）為不得開發建築</td></tr>
<tr><td>非都市土地開發審議作業規範</td><td>總編第 26 點 ：「基地開發應分析環境地質及基地地質，如在潛在地質災害具有影響相鄰地區及基地安全之可能性者，其災害影響範圍內不得開發……」
專編第 11 編，海埔地開發：「第 4 項，申請開發之海埔地，其地點非經各該目的事業主管機關之同意，不得位於下列地區內，… (13) 活動斷層五百公尺之範圍。」</td><td>規定活動斷層一定範圍不得開發（海埔地）</td></tr>
<tr><td>海埔地開發管理辦法</td><td>第 9 條：「開發申請案經審查符合左列各款條件，得許可開發……對環境保護、自然保育及災害防止為完全之考慮者……。」</td><td>間接禁止活動斷層地區開發</td></tr>
<tr><td>實施區域計畫地區建築管理辦法</td><td>第 4 條之一 ：「活動斷層線通過地區，當地縣（市）政府得劃定範圍予以公告，並依左列規定管制不得興建公有建築物。依非都市土地使用管制規則規定得為建築使用之土地，其建築物高度不得超過二層樓、簷高不得超過七公尺，並限作自用農舍或自用住宅使用。於各種用地內申請建築自用農舍，除其建築物高度不得超過二層樓、簷高不得超過七公尺外，依第五條規定辦理。」
第 5 條：「於各種用地內申請建造自用農舍者，其總樓地板面積不得超過 495 平方公尺，建築面積不得超過其耕地面積百分之十，建築物高度不得超過三層樓並不得超過 10.5 公尺，但最大基層建築面積不得超過 330 平方公尺。前項自用農舍得免由建築師設計、監造或營造業承造。」</td><td>1.授權地方政府管制權力。
2.規定活動斷層通過地區管制方法</td></tr>
<tr><td>製定非都市土地使用分區圖及編定各種使用地作業須知</td><td>第 7 項第 6 點：「非都市土地使用分區檢討之原則，劃定或檢討變更為山坡地保育區……潛在地質災害地區……。
附錄第 6 項：「山坡地保育區劃定標準：屬於山坡地保育利用條例第 3 條規定之山坡地，並具有以下情形者…斷層、邊坡不穩定地區…。」</td><td>間接將活動斷層所在之非都市土地劃定或變更為山坡地保育區</td></tr>
</table>

1. 現地調查

車籠埔斷層活動至今已十年，過去斷層活動剛發生時地調所及諸多專家學者曾現

勘過斷裂跡與變形帶，本次現地調查著重於觀察十年來的變化，欲了解車籠埔斷層地表變形帶有沒有合適的應變指示地景地物；在變形帶中土壤與結構互制的情形；人工結構物因應的作為與智慧；將現地觀察現象結合竹山槽溝剖面，探討數值模擬現地的簡化假設。

1-1. 車籠埔斷層

(一) 研究範圍：

車籠埔斷層呈南北向延伸，向西逆衝之斷層(如圖 3-1-1 所示)，根據地調所調查斷層長約一百公里，並造成東側(上盤)區域最高隆起八、九公尺不等，活動範圍南起南投縣清水溪的桶頭橋，北至豐原之後轉向東方，在石岡東勢區域引至地表破裂，並延伸至苗栗縣卓蘭鎮的象山村，影響流域包括大甲溪流域及大安溪流域(中央地調所，1999)。

本斷層北段在豐原北陽里以南至烏溪之間，大致呈北北東至南北走向，斷層大致沿著桂竹林層與錦水頁岩的界面，或在錦水頁岩中滑動，由斷層擦痕顯示已逆滑至逆斜滑為主。南段在烏溪至濁水溪之間，大致呈南北走向，斷層大致在錦水頁岩或錦水頁岩與卓蘭層的界面附近滑動，由斷層擦痕顯示以逆滑至逆斜滑為主。在濁水溪以南，斷層約呈北北東走向，至竹山後轉為北北西走向，主要斷層帶位於錦水頁岩與卓蘭層的界面，以逆滑至逆斜滑為主(中央地調所，1998)。

(二) 斷層特性：

針對車籠埔斷層槽溝挖掘研究調查，中央地質調查所目前已進行之挖溝資料(中央地調所，2001, Chen *et al.*, 2001、2004、2007；陳文山等人，2000a、2000b, Lin, *et al.*, 2007a、2007b)，根據其研究結果顯示，車籠埔斷層在集集地震事件，依近地表變形特色可以分三段，北段為石岡段，上盤位移方向約 N30-40°W，屬於逆衝左移斷層作用，地表附近垂直位移量最大(3-9.5 公尺)，主要發生在錦水頁岩之中，主斷層破裂跡上下盤還有多道分支或次生破裂跡; 中段草屯段(車籠埔段)，上盤位移方向約 N70-90°W，屬於逆衝斷層作用，地表附近垂直位移量最大(0.5-3 公尺)，上盤主要是錦水頁岩、下盤為礫石層; 南段大尖山段，上盤位移方向約

N50°E，屬於右移逆衝斷層作用，地表附近垂直位移量最大(0.2-1 公尺)，研究最少，上盤地層未有探討。有關車籠埔斷層沿線槽溝的分布，初步整理如圖 3-1-1 及表 3-1-1 所示。

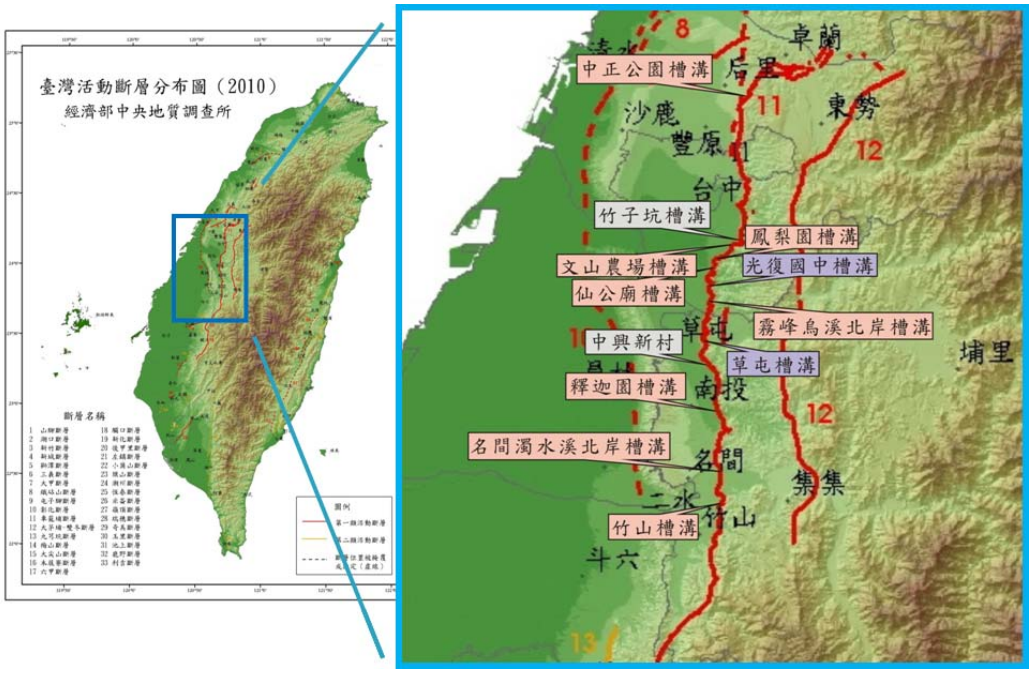


圖 3-1-1 921 地震斷層沿線槽溝分布位置(中央地質調查所，2010)

表 3-1-1 921 地震斷層沿線槽溝彙整表

主要調查人	槽溝名稱	地點	槽溝數目	井孔數目	挖掘年份
陳文山	豐原中正公園槽溝	豐原中正公園	1	0	2001
陳文山	仙公廟槽溝	台中縣霧峰鄉	2	2	2001
陳文山	文山農場槽溝	大里文山農場	3	2	2001
陳文山	鳳梨園槽溝	台中縣霧峰鄉	2	1	2001
陳文山	釋迦園槽溝	南投縣中寮鄉	1	3	2001
陳文山	竹山槽溝	南投縣竹山鎮	1	2	2003
陳文山	霧峰烏溪北岸槽溝	台中縣霧峰鄉	2	0	2001
陳文山	名間濁水溪北岸槽溝	南投縣名間	1	0	2001
太田陽子	光復國中槽溝	台中縣霧峰鄉	1	0	2000
太田陽子	草屯槽溝	南投草屯鎮	1	0	2001

李錫堤	竹子坑槽溝	台中縣霧峰鄉	1	0	2000
李錫堤	中興新村槽溝	南投草屯鎮	3	0	2000
李建成*	霧峰烏溪北岸槽溝	台中縣霧峰鄉	2	0	2001
袁彼得	光復國中槽溝	台中縣霧峰鄉	1	0	2000
*：李建成、陳文山在 2001 年霧峰烏溪北岸槽溝是相同槽溝					

有關古地震研究槽溝中近斷層的土層變形行為的調查與描述，以竹山溝說明如下：由竹山槽溝災前後之地形圖(像片基本圖)比較及現地調查及槽溝開挖所得比對得知，近斷層之變形特徵(包括地表的破裂變形帶範圍及剖面中的細微變形特徵)，基本上是無法由航照或衛星影像判釋得知，一定要輔以地表調查及槽溝開挖。而地表附近地層的變異也讓槽溝開挖之前無法預知像本槽溝所見，在很短距離內，槽溝北、南牆之間之變形特徵有很大的變異(圖 3-1-2~6) (Chen *et al*., 2007、Huang *et al*., 2010) 。針對竹山溝南北牆的變形，Chen *et al*.(2007)研究所製作的復原剖面，如圖 3-1-6 所示。

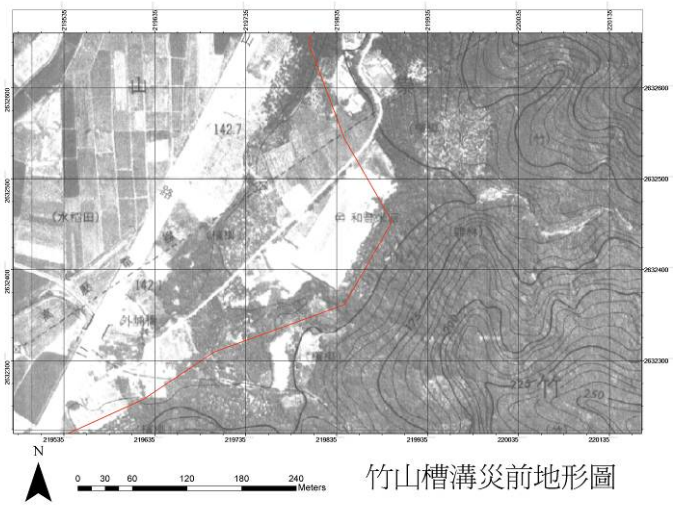


圖 3-1-2 竹山槽溝附近災前五千分之一地形圖

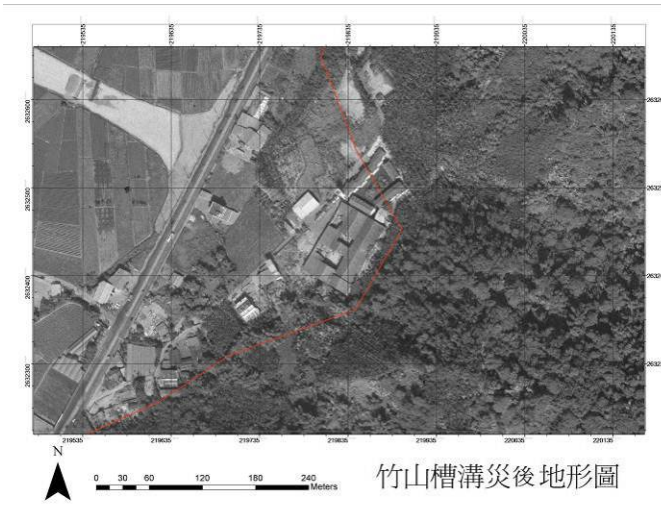


圖 3-1-3 竹山槽溝附近災後五千分之一地形圖

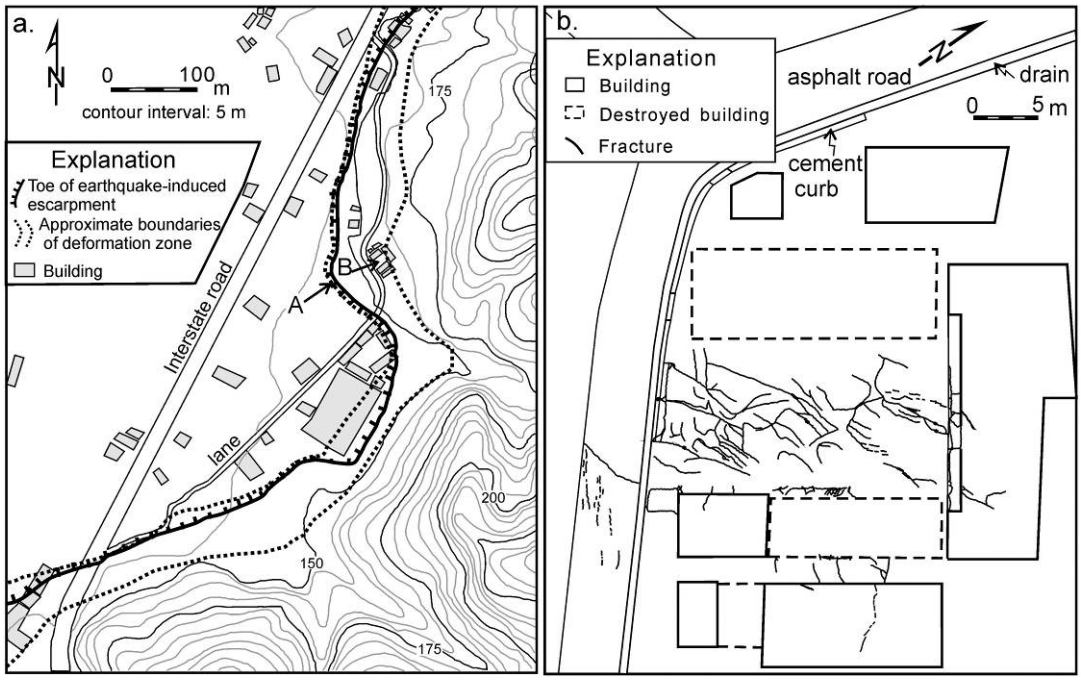


圖 3-1-4 南投縣竹山鎮他里溫九二一車籠埔斷層地表的變形帶。左圖為推估的地震變形帶呈現於五千分之一地形圖的範例。右圖為變形帶裡詳細的破裂跡圖，其位置即左圖中的 B。(Huang, 2010 整理)

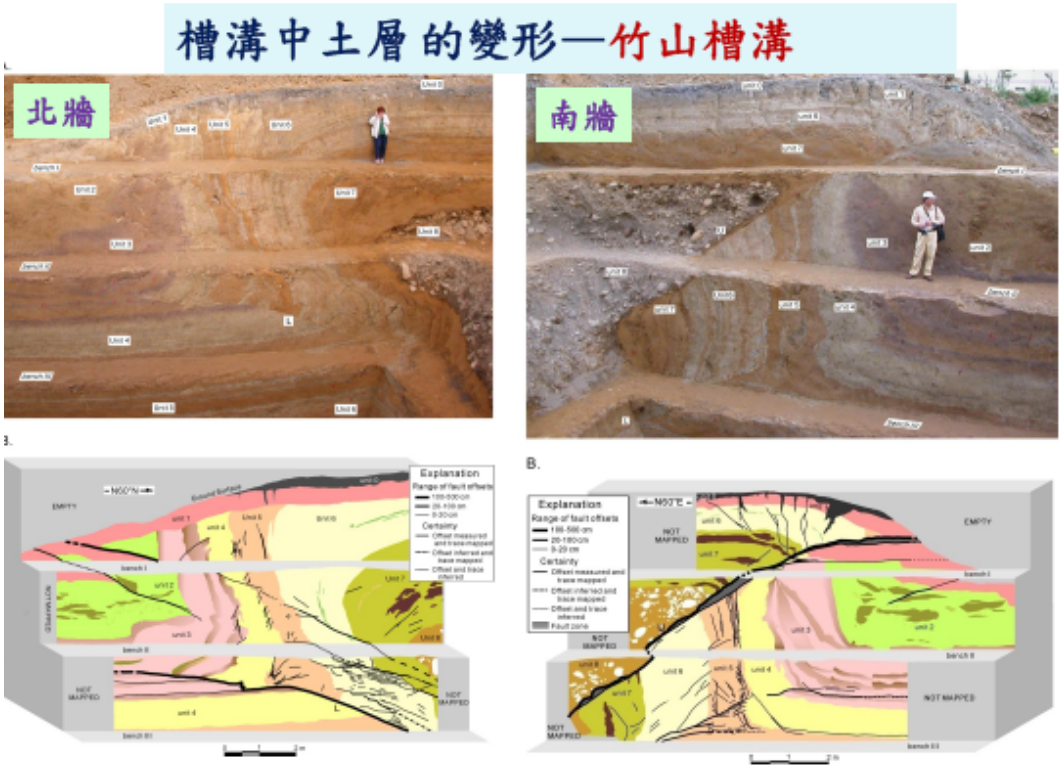


圖 3-1-5 車籠埔斷層竹山槽溝北、南牆剖面 (Huang et al., 2010)

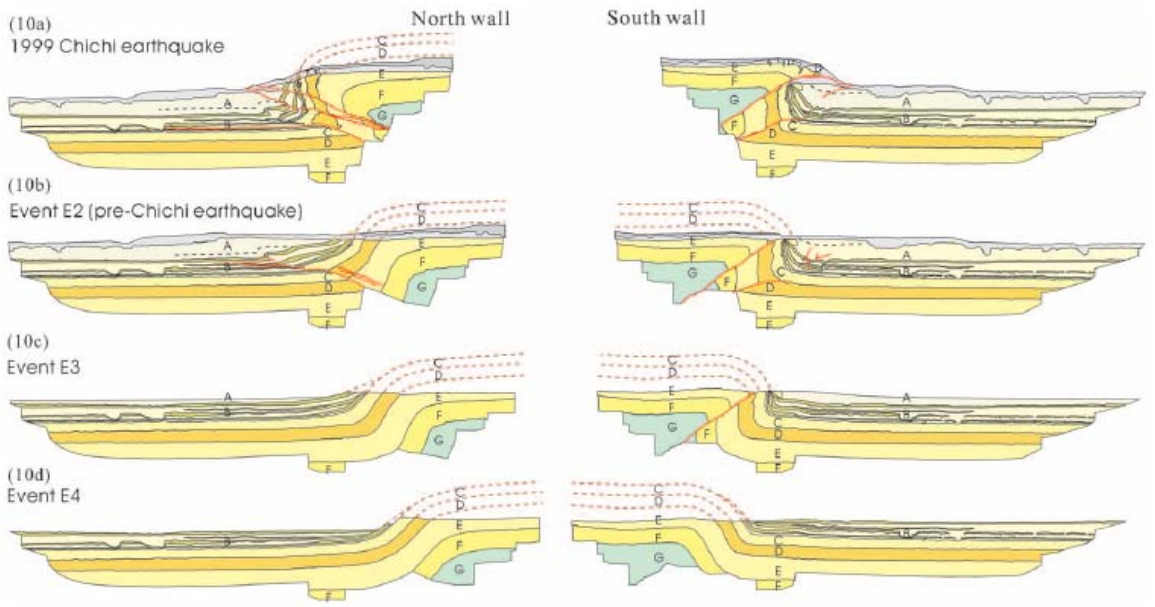


圖 3-1-6 車籠埔斷層竹山槽溝北、南牆剖面之復原 (Chen et al., 2007)

(三) 竹山槽溝土壤特性及地質鑽探：

關於車籠埔斷層沿線之土層特性，本研究蒐集斷層沿線已開挖之槽溝資料(所在位置包括豐原中正公園、大里文山農場、霧峰仙公廟、南投竹山、霧峰某處鳳梨園、南投某處釋迦園共六處)，以及竹山斷層博物館預定地內之工程鑽探及試驗資料，做為本研究之初步分析資料來源。由於竹山槽溝位於竹山博物館內，可獲得之資訊恰可以與博物館預定地內之土壤工程鑽孔資訊做一比對，因此，本研究初期將以竹山槽溝及鄰近之工程鑽孔資料，做為判斷竹山當地靠近車籠埔斷層土層之主要依據，中後期若有地調所進行之工程鑽孔資料，則將視情形新增或更新所蒐集資料庫內之資料及分析工程參數。圖 3-1-7 所示為車籠埔斷層竹山槽溝及附近工程鑽孔之相對位置圖。



圖 3-1-7 車籠埔斷層竹山博物館預定地附近鑽井及工程鑽孔位置圖

竹山槽溝附近土層資料整理(圖 3-1-7)，資料來源：1.竹山槽溝附近鑽井(竹山一號及二號井及工程鑽井 8 孔)及岩心照片 (距槽溝約 40-60 公尺)，2.竹山斷層博物館土壤鑽探資料 (詳細鑽孔位置不明)，3.竹山槽溝部分土層室內試驗資料，4.地調所工程地質資料庫(距離竹山槽溝至少 400 公尺，不採用)。

竹山二號井(上盤鑽井)及**竹山一號井**(下盤鑽井)資料(圖 3-1-8)及對應之岩心照片資料(圖 3-1-9)。

上盤鑽井：地表至約 2.7 公尺-黃棕色粉(黏)土及細砂層；地表下 2.7 至 15.8 公尺– 灰黑色礫石層；地表下 15.8 至 54.3 公尺– 灰色砂岩及粉砂岩；地表下 54.3 至 60 公尺– 礫石層夾層砂層。

下盤鑽井：地表至約 8 公尺-黃棕色粉(黏)土及細砂層偶夾有機質；地表下 8 至 15.8 公尺– 灰黑色礫石層；地表下 15.8 至 19.4 公尺–黃棕色粉(黏)土及細砂層；地表下 19.4 至 24.1 公尺– 礫石層夾層粉土/黏土層；地表下 24.1 至 25 公尺– 黃棕色粉土/黏土層；地表下 25 至 27.4 公尺– 礫石層；地表下 27.7 至 29.6 公尺 -黃棕色

粉土/黏土層；地表下 29.6 至 32 公尺– 礫石層；地表下 32 至 39.4 公尺 – 粉土/黏土層；地表下 39.4 至 50 公尺 – 礫石層夾砂層及粉土層。

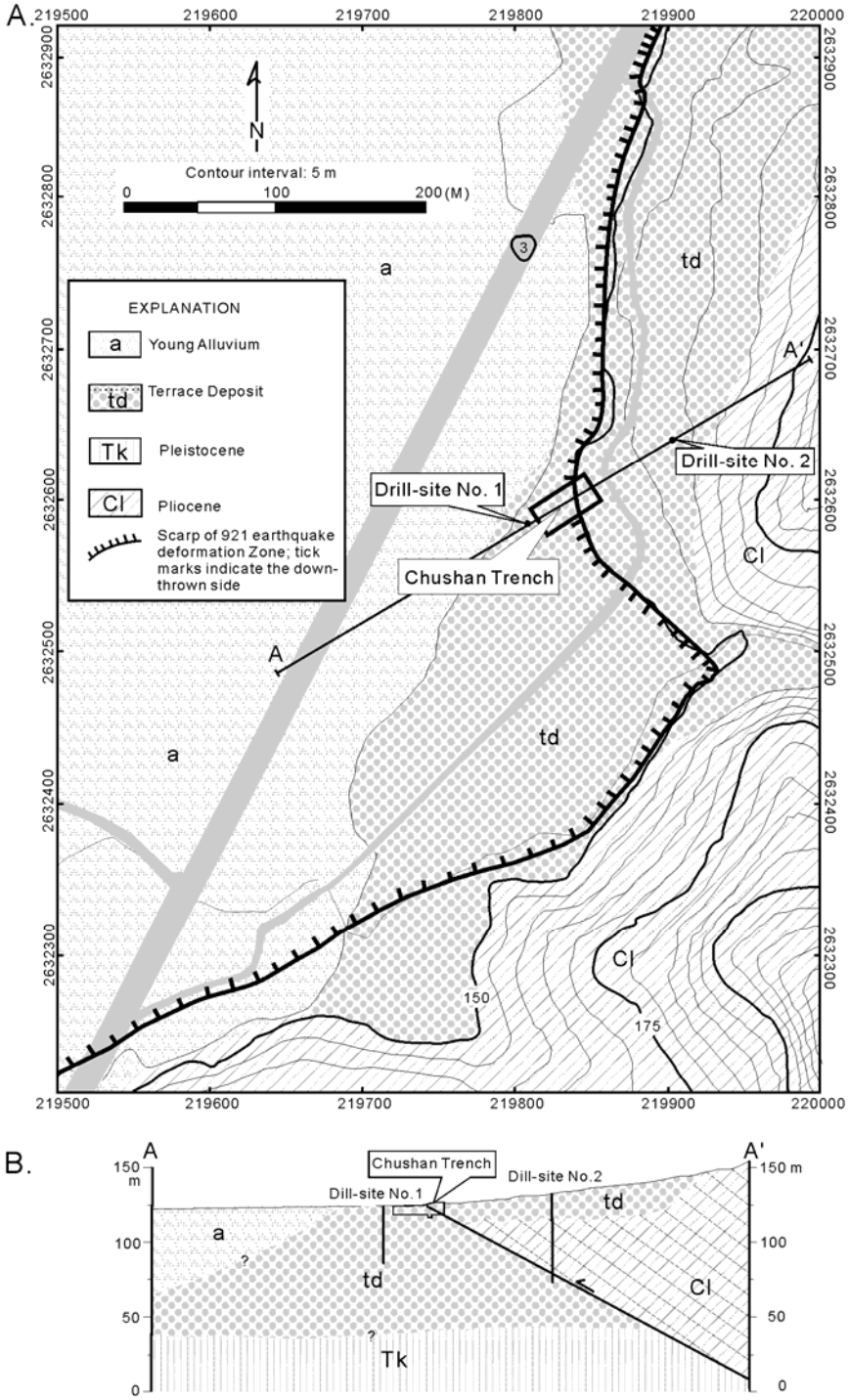


圖 3-1-8 竹山二號井(上盤鑽井)及竹山一號井(下盤鑽井)位置及地質圖

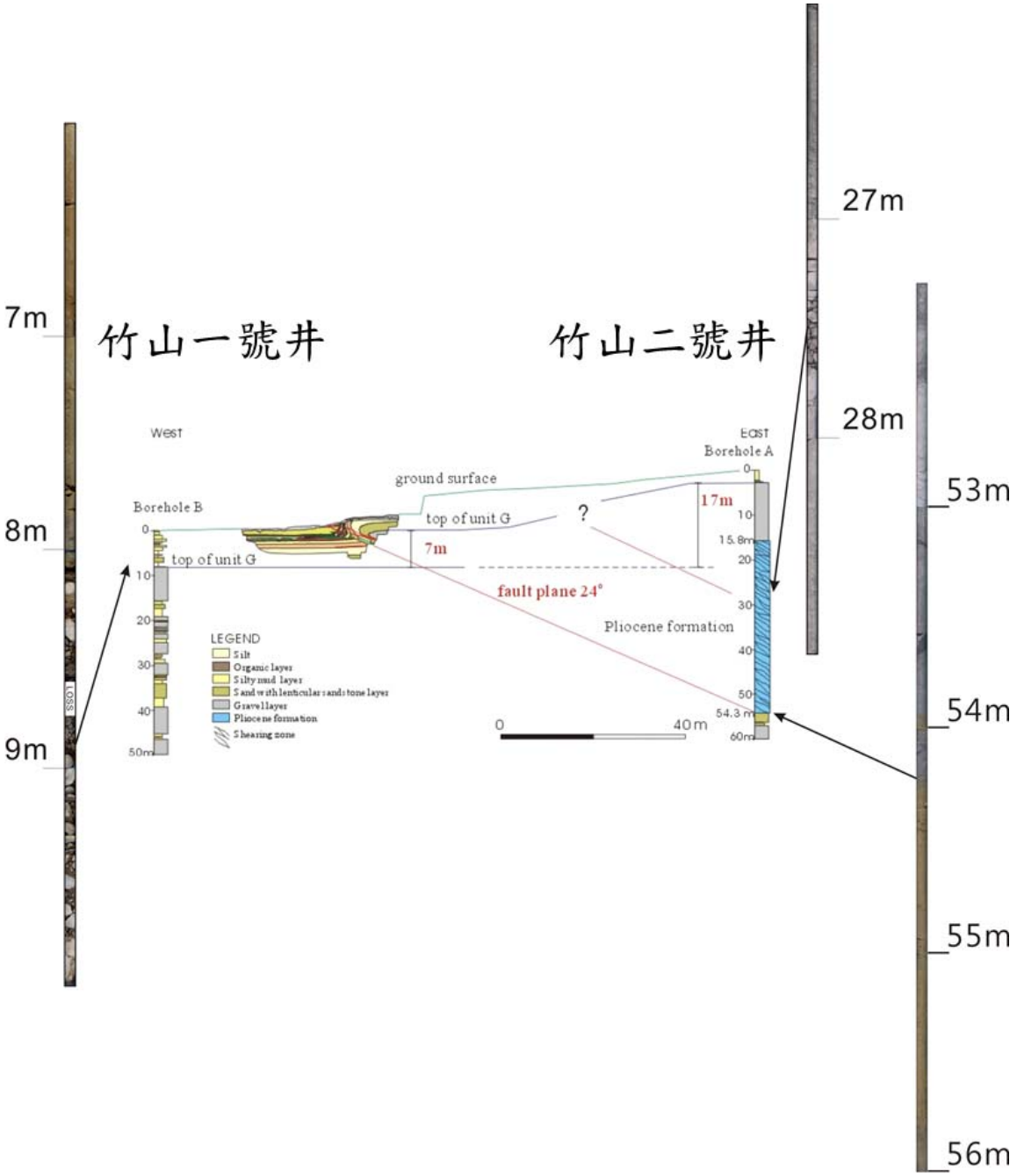


圖 3-1-9 地質鑽探與竹山溝比對

竹山博物館鑽探資料(圖 3-1-10)－槽溝鑽孔為：

上盤部分(A1~A3，A1、A3 靠近槽溝南牆；A2 位置不清，由鑽探報告得知亦靠近槽溝)，上盤淺層 (10 公尺內) 土壤主要分為：

(1) 地表至 2~7 公尺深：棕黃色軟弱至中等強度砂質粉(黏)土，偶夾礫石直剪試驗：摩擦角 26~28 度，凝聚力約為 20kPa，自然含水量：5~7%(SM)以及 17%~28%(CL~ML)，現地密度(g/cm^3):1.94~2.09，無圍壓縮試驗單壓強度

(q_u)：約為 50~82 kPa，SPT-N 值：6 ~17。

(2) 地表下 2~7 公尺至 25 公尺處(鑽孔底部)：灰黑色礫石層 – 無樣本，SPT-N 值 – 100 次。

(3) A2 鑽孔指出近槽溝地下水位約於地表下 11.6 公尺處。

下盤部分 (A4~A8，A5、A6 靠近北牆、A4、A8 靠近南牆，A7 南北牆之間)，上下盤鑽孔地表高程變化約為 EL 146.7m~148.7m (上盤)到 EL 145.3m~145.9 m(下盤)，**近北牆**淺層 (10 公尺內) 土壤主要分為：

(1) 地表至約 7 公尺深：棕黃色軟弱砂質粉(黏)土，偶夾礫石(USCS:CL-ML)，自然含水量 20~25%，PI 無塑性(NP)至 14，直剪試驗：摩擦角 27 度，凝聚力約為 15kPa，無圍壓縮試驗單壓強度(q_u)：約為 28kPa，SPT-N 值：6 ~8。

(2) 地表下 7 公尺至 25 公尺處(鑽孔底部)：灰黑色礫石層偶夾粗中細砂及薄層黏土– 無樣本，SPT-N 值–100 次

試驗結果蒐集及整理：利用竹山博物館預定地附近之槽溝、鑽井以及工程鑽孔資料，建議將地層簡化如下以利後續進行數值分析或結果討論之用。

- ✓ **0~2 公尺深：黃棕色軟弱至中等強度粉土及黏土**
- ✓ **2~25 公尺深：灰黑色卵礫石層，偶夾細砂及粉土、黏土**

進行數值分析除了需將土層分層簡化(整體幾何模型)之外，尚需土壤工程參數及組成律模式等，才足以進行相關分析及討論。至目前為止，竹山博物館預定地由於先前已因工程需要而進行一系列土壤一般物性及力學實驗，因此，數值分析所需之土壤參數可由相關實驗推估而得。一般描述土壤力學行為所需參數為土壤之凝聚力(cohesion，c)、摩擦角(friction angle，ϕ)、土壤單位重(unit weight，γ)、彈性模數(elastic modulus，E)與波松比(Poisson's ratio，ν)等。

由於竹山博物館預定地內工程鑽孔取得之樣本大多為淺層土壤(粉土或黏土一類)，進行之一般物性及力學試驗僅限於取得樣本之部分，因此，淺層土壤之參數估計乃基於相關之試驗結果，而較深層偏礫石層之部分，因缺乏樣本及室內實驗結果，其土壤參數僅參照卵礫石層相關文獻以及現地之標準貫入試驗值(SPT-N)估

計而得。

由上述土壤之力學試驗結果以及相關文獻，建議使用土壤力學參數如下：

- **0~2 公尺深：黃棕色軟弱至中等強度粉土及黏土**
- ✓ **單位重：20 kN/m3**
- ✓ **凝聚力：20 kN/m2**
- ✓ **摩擦角：27 度**
- **2~25 公尺深：灰黑色卵礫石層，偶夾細砂及粉土、黏土**
- ✓ **單位重：22 kN/m3**
- ✓ **凝聚力：0 kN/m2**
- ✓ **摩擦角：45 度**

描述土壤變形性之參數部分(E，ν)，可由無圍壓縮試驗之應力應變曲線推估而得。竹山斷層博物館工程所進行之工程鑽孔部分，其中鑽孔 A2 及 A3 分別於地表下 2.9 公尺及 3.5 公尺處，進行無圍壓縮試驗整理而得之應力應變曲線如圖 3-1-11 所示，其中位於地表下 2.9 公尺及 3.5 公尺處之試體，推估切線彈性模數分別為 1480kPa 與 640kPa。

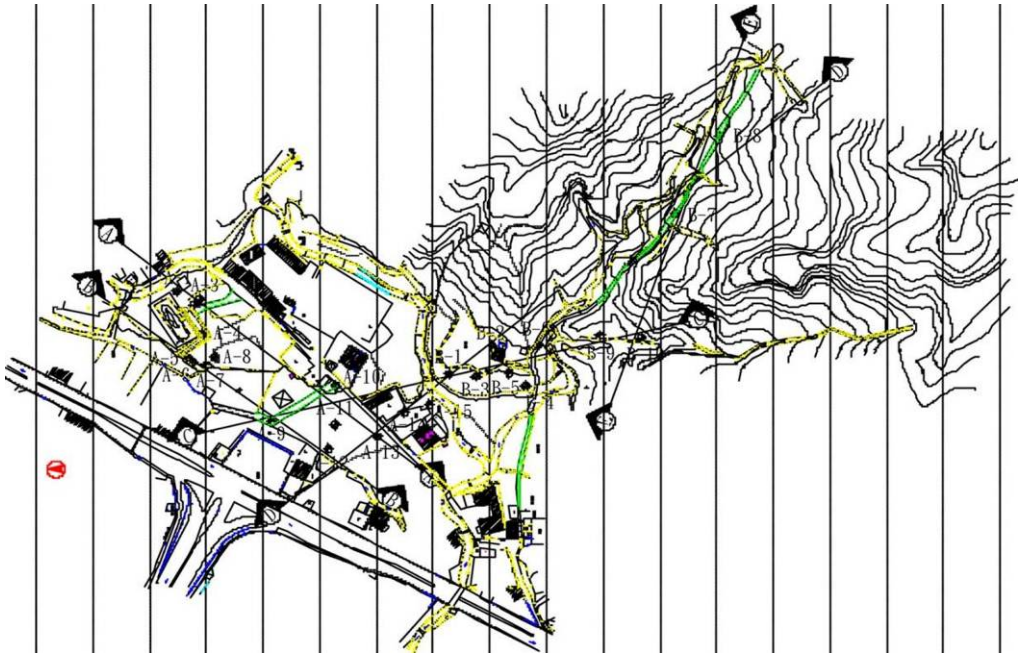


圖 3-1-10 竹山博物館鑽探位置

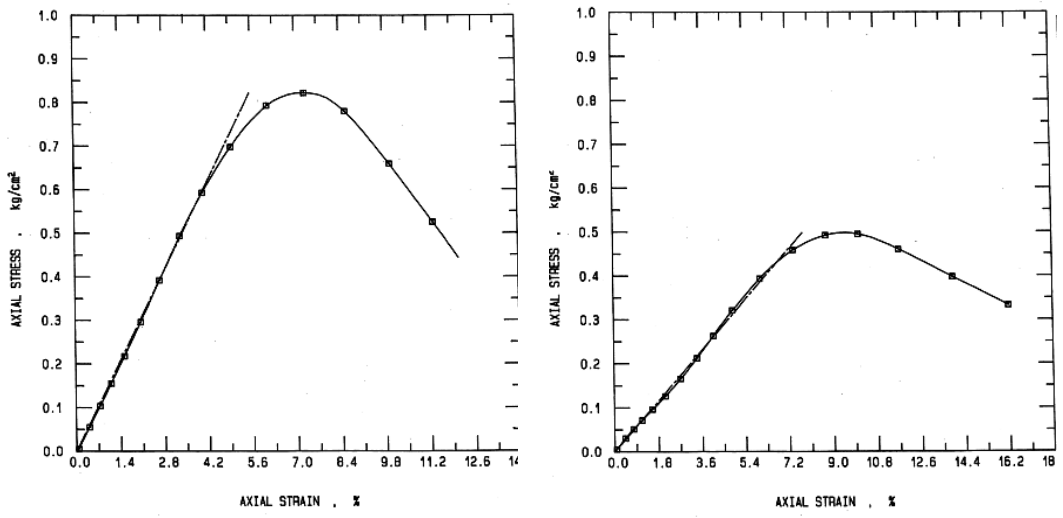


圖 3-1-11 竹山博物館工程鑽孔 A2 及 A3 進行無圍壓縮試驗應力應變曲線

若由鑽孔 A7 及 A12 分別位於地表下 4.35 公尺及 1.85 公尺處之土壤樣本進行之三軸壓密不排水壓縮試驗結果推估，其樣本分別在不同圍壓下，其軸差應力及應變之關係如圖 3-1-12 所示，割線模數整理如下表 3-1-2 所示：

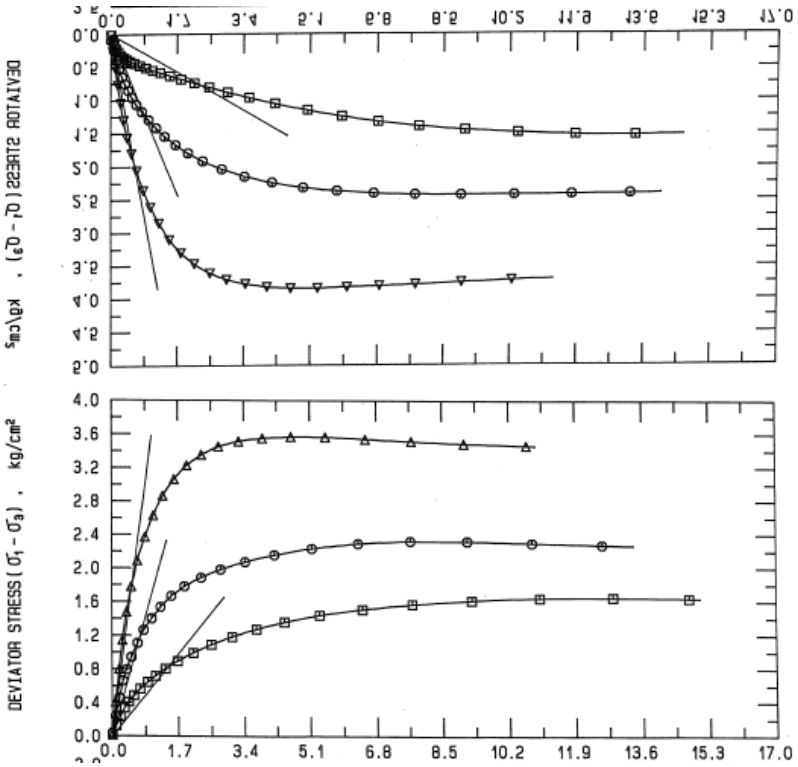


圖 3-1-12 三軸壓密不排水壓縮試驗應力應變曲線(竹山博物館工程鑽孔 A7(上圖)4.35 公尺及 A12(下圖)1.85 公尺)

表 3-1-2 三軸壓密不排水壓縮試驗推估之割線模數

	A7-土樣深度 4.35 公尺	A12-土樣深度 1.85 公尺
圍壓 50kPa (約地表下 5 公尺)	3390 kPa	5740 kPa
圍壓 100kPa (約地表下 10 公尺)	14140 kPa	16440 kPa
圍壓 200kPa (約地表下 20 公尺)	31820 kPa	34810 kPa

上述實驗結果指出，淺層土層(地表下 2.5 公尺左右)之割線模數約為 3500 ~ 6000kPa，若淺層土層(粉質黏土)受到相當於地表下 5 公尺處之圍壓，則割線模數約為 14000 ~ 16000kPa，以及相同粉質黏性土壤在地表下 10 公尺處之割線模數約為 32000 ~ 35000kPa。

其次，現地之標準貫入試驗指出竹山槽溝淺層土壤附近之標準貫入試驗值 SPT-N 變化範圍約在 6 到 17 次，由 Ohya (1982)等人建議之經驗式及下圖 3-1-13，亦可推估其對應之彈性模數之變動範圍在 5960-11500 kPa，與上述三軸力學試驗所推估之結果相近。

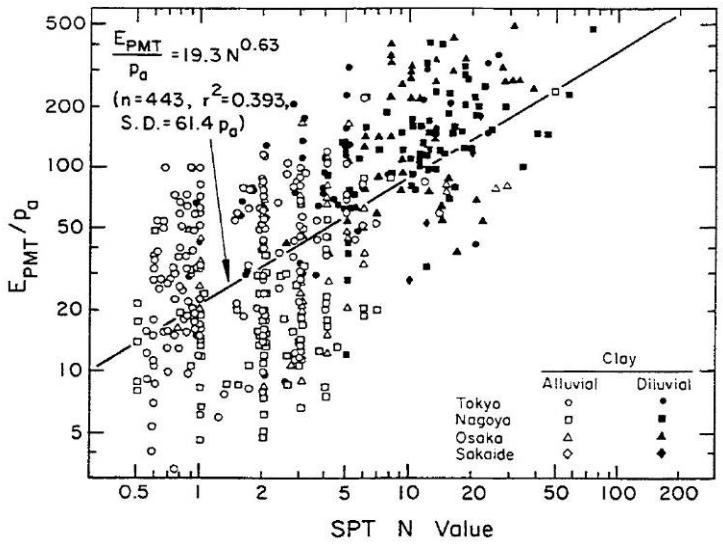


圖 3-1-13 以標準貫入試驗 N 值推估彈性模數 (Ohya et. al, 1982)

由上述室內試驗結果可以得知，土壤之彈性模數於研究之土層深度範圍內有

一定之變動趨勢。由於竹山槽溝附近之土層已藉由相關資料簡化為兩層，因此，其彈性模數以及波松比建議如下：

- ◆ **0~2 公尺深：黃棕色軟弱至中等強度粉土及黏土**
- ✓ **彈性模數：3.5~6.0 MN/m^2**
- ✓ **波松比：0.49**
- ◆ **2~25 公尺深：灰黑色卵礫石層，偶夾細砂及粉土、黏土**
- ✓ **彈性模數：120 MN/m^2**
- ✓ **波松比：0.4**

往後分析時，將先以最具代表(例如平均值)之土壤力學參數代入數值模型進行分析，之後再考慮上述參數之相關變異性，以取得相關地表變形之變動範圍或垂直錯移量等探討重點。

(四) 豐原中正公園南北井鑽探土層特性整理結果

由經濟部中央地質調查所委託相關廠商進行之工程地質鑽探工作，主要進行鑽探、實驗項目之工作以及鑽探實驗結果報告。為使本計畫進行更加順利，鑽探位置由本計畫協助選定，並針對特定土壤或岩石樣本，建議相關之實驗項目以利計畫之進行。此次工程地質鑽探在車籠埔斷層的部分選定兩孔，位置分別如圖 3-1-14 所示，其中一孔位於台中市豐原中正公園(以下稱為中正公園北井)，以及另一孔位於豐原中正公園西南側(以下稱為中正公園南井)，直線距離約為 620 公尺，另外此鑽探點距離先前使用其資料進行土層簡化之竹山槽溝約為 50 公里(直線距離)。圖 3-1-15 為該地區災前後五千分之一正射影像地形圖，顯示地震過後地表變形。

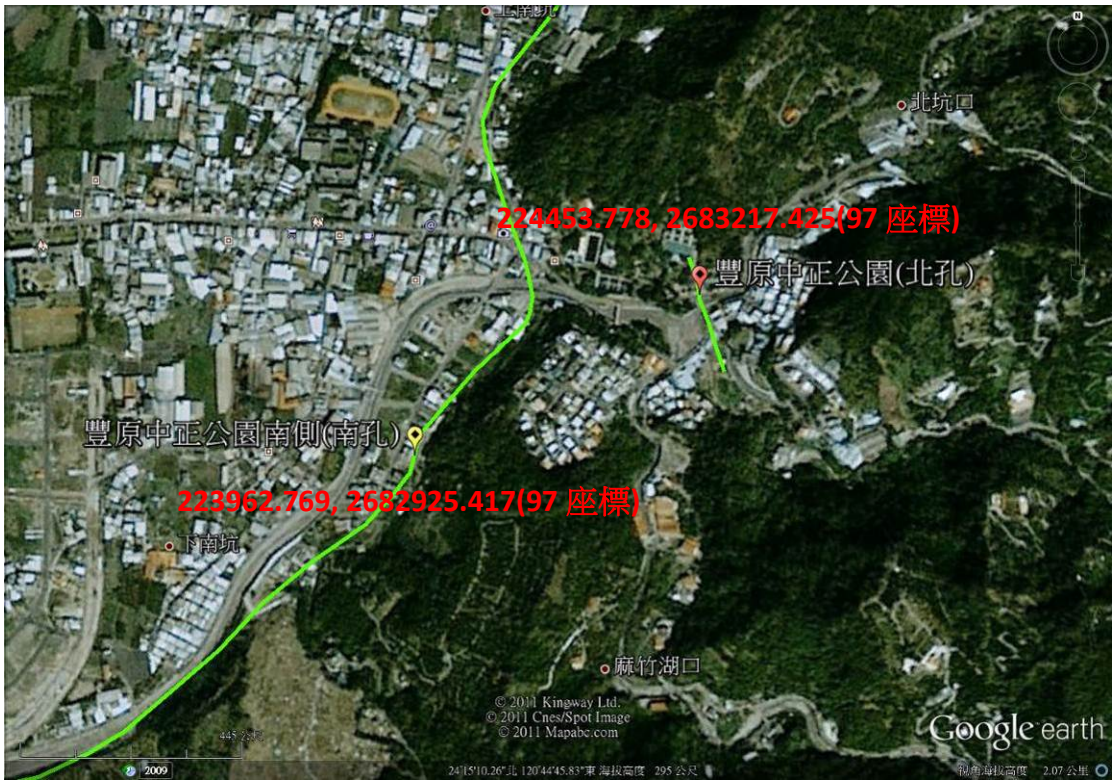


圖 3-1-14 車籠埔斷層近豐原中正公園北、南井位置圖

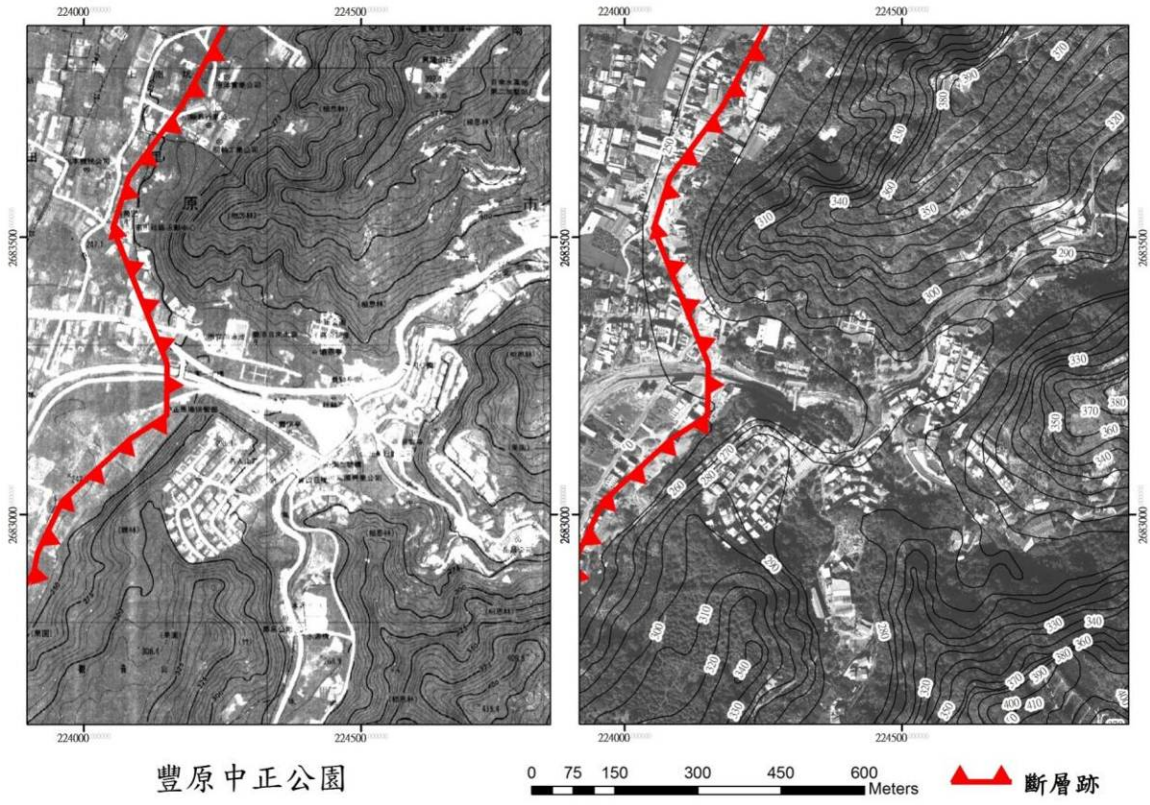


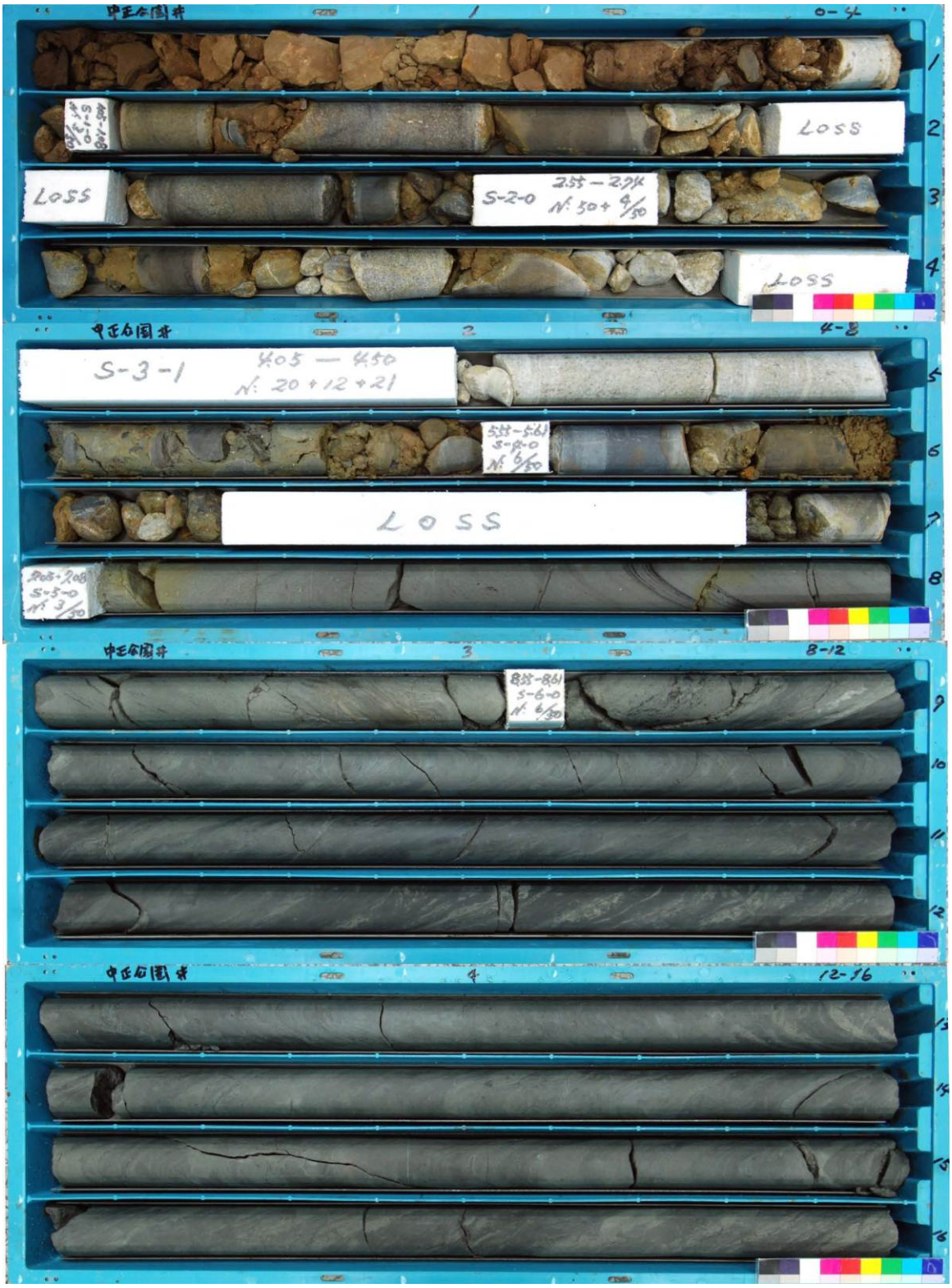
圖 3-1-15 車籠埔斷層近豐原中正公園災前後正射影像(左圖-災前，右圖-災後)

照片 3-1-1 所示為現場鑽探情形，照片 3-1-2 所示為中正公園北井之樣本置放於岩心箱情形(文字描述僅節錄地表至 12 公尺深處)，由岩心照片可以看出，淺層土壤在地表下 1 公尺內大多為黃棕色受到高度擾動且破碎之回填土，其下為灰色之卵礫石或礫石偶夾土壤(岩心箱資訊指出該深度之土壤已另行包裝以進行相關土壤力學實驗)，夾雜之土壤外觀及特性未知。在深度 4.05 公尺到深度 4.5 公尺之間進行之標準貫入試驗得到其 N 值為 33 次，代表該深度土壤為中等緊密到緊密土壤。地表下 7 公尺深至 30 公尺處為砂頁岩互層並夾細砂，依此判斷岩層在北孔內之地表下 7 公尺左右即出現。由現地記錄之鑽探報告草稿亦可以得知，中正公園北井之斷層剪裂帶約位於地表下 17 公尺到 22 公尺之間。(註：報告中提到之顏色均以照片之產狀或色彩做判斷之唯一依據)

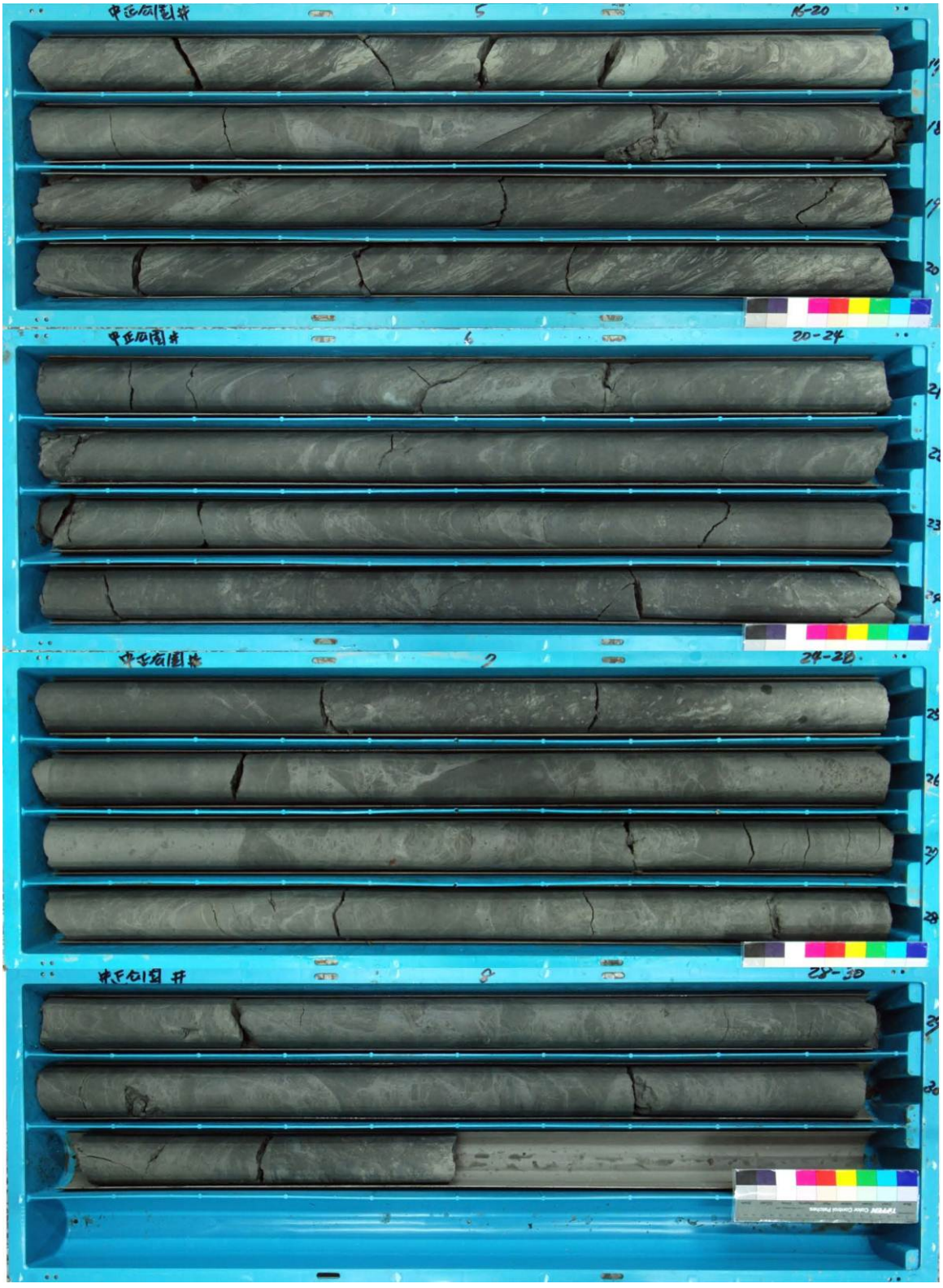


(a) (b)

照片 3-1-1 豐原中正公園鑽探照片(a)中正公園北井(b)中正公園南井

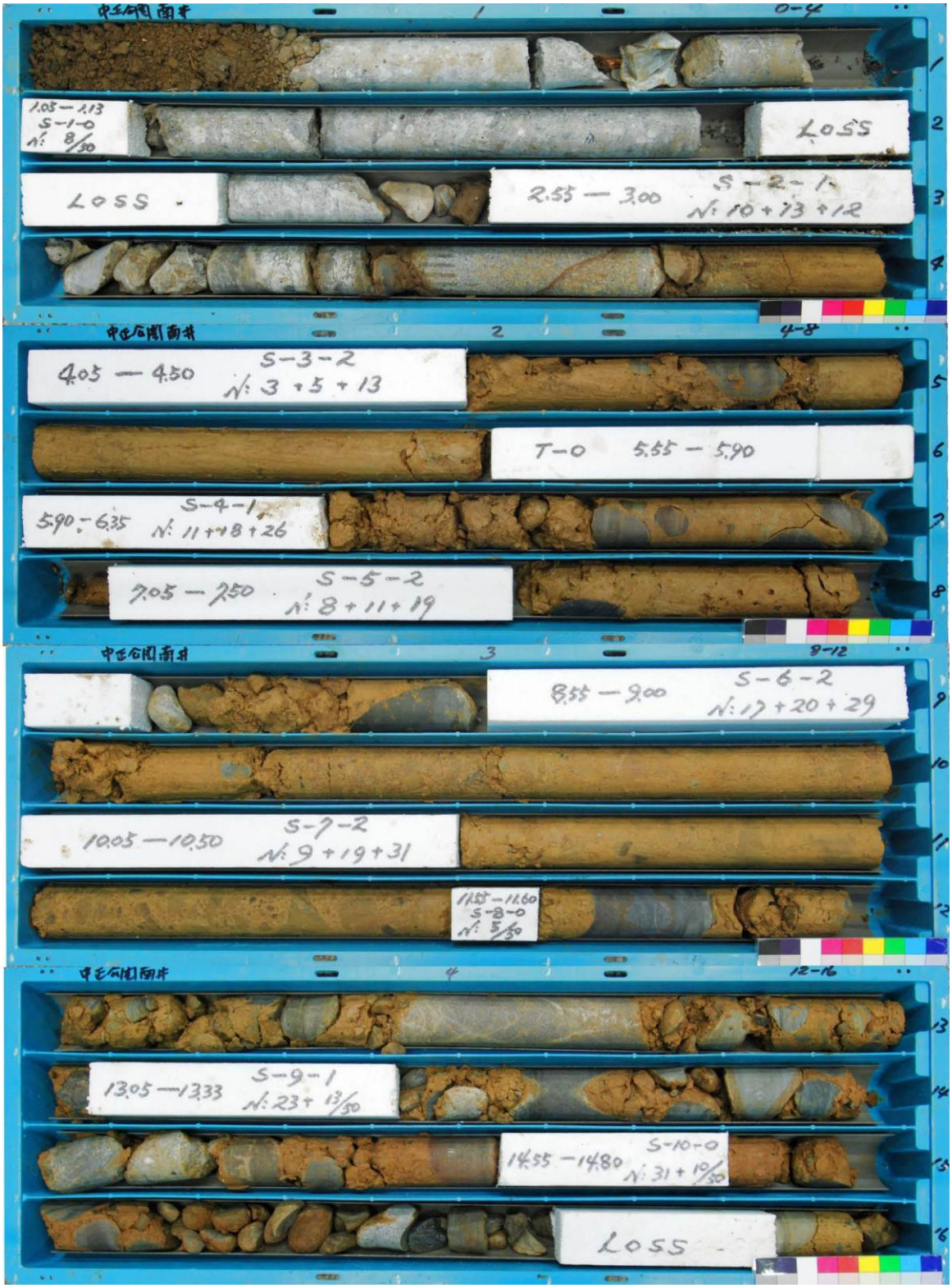


照片 3-1-2 中正公園北井岩心照片

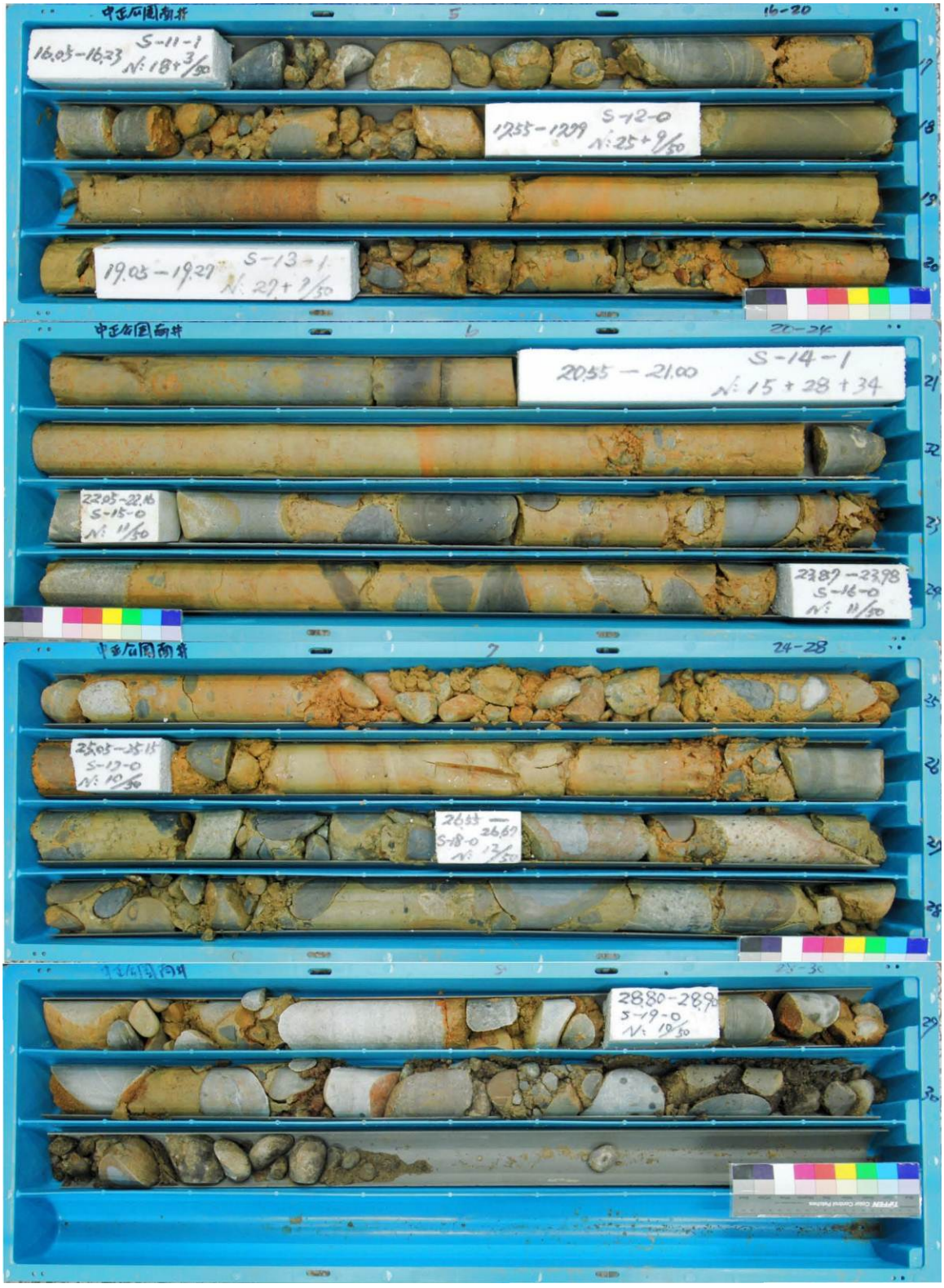


照片 3-1-2 中正公園北井岩心照片 (續)

中正公園南井部分如照片 3-1-3 所示，由照片判斷，淺層土壤在地表下 0.3 公尺內大多為黃棕色受到高度擾動且破碎之回填土，地表下 0.3 公尺至 3.25 公尺處為混凝土，3.25 公尺至 4.05 公尺處為卵礫石出露，4.05 公尺 4.05 公尺至 10 公尺處，應為夾雜卵礫石之黃棕色粉黏土，偶夾砂，其中由標準貫入試驗 N 值可以得知，地表下 4.05 公尺到 4.5 公尺處之標準貫入試驗 N 值為 18，地表下 5.9 公尺到 6.35 公尺處之標準貫入試驗 N 值為 44，地表下 7.05 公尺到 7.5 公尺處之標準貫入試驗 N 值為 30，地表下 8.55 公尺到 9.0 公尺處之標準貫入試驗 N 值為 49，地表下 10.05 公尺到 10.5 公尺處之標準貫入試驗 N 值為 40，其強度有隨深度增加而變大之趨勢。而由地表下 12 公尺處至 18 公尺處，土層主要為卵礫石層夾雜黃棕色黏土或粉土及砂層，由於本層大多遭遇卵礫石等材料，因此進行標準貫入試驗所得到之 N 值皆大於 50。地表下 18 公尺處至 22 公尺處(其中 19.3 公尺處到 20 公尺處土樣樣本缺乏，無法判斷)，判斷為黏土層夾砂。地表下 22 公尺處到約 30 公尺處，主要為卵礫石材料，並夾雜大量黃棕色粉黏土或砂性土壤。



照片 3-1-3 中正公園南井岩心照片



照片 3-1-3 中正公園南井岩心照片 (續)

對照在竹山槽溝附近之鑽探以及挖溝資料而建議之簡化土壤分層可以得知，竹山槽構附近之地層情形與中正公園附近不盡相同。竹山槽溝附近，土層由地表至 2 公尺深處為黏土層，而地表下 2 公尺深處至 25 公尺深處為卵礫石夾雜細砂或粉土、黏土。就目前的資訊而言，中正公園北井土樣及岩心照片指出地表至地表下 7 公尺處為卵礫石夾雜細砂或粉土、黏土，地表下 7 公尺至 30 公尺處為砂頁岩互層，由於中正公園北井座落於河床旁之階地上，可以預期到該鑽孔之淺層土壤大部分應為卵礫石材料，下方岩層即開始出現，另外中正公園北井位置並非座落在車籠埔斷層主要破裂帶，而是位於其東側且長度約為 200 公尺之次要破裂帶。

而中正公園南井之土層部分，其淺層土壤由地表至約地表下 7 公尺處為夾雜卵礫石之黃棕色粉黏土，其下則大多為卵礫石材料，並偶夾黏土層及砂層。中正公園南井之材料性質相較於竹山槽溝部分，由現有資料看來較為類似。

岩心取樣後進行之各項實驗結果完整報告請見附錄，由這次的實驗結果可以得到如表 3-1-3 之數據，做為明年度開始進行之車籠埔斷層數值模擬的參數依據。

表 3-1-3 中正公園北、南井岩心室內實驗結果(地調所，2011b)

中正公園北井				
深度	土壤、岩石分類	單位重 γ_d (kN/m^3)	摩擦角 (度)	凝聚力 (kPa)
29.25~30.40	岩石	23.77	32.6	670.58
中正公園南井				
深度	土壤、岩石分類	單位重 γ_d (kN/m^3)	摩擦角 (度)	凝聚力 (kPa)
21.00~21.60	土壤	26.4	24.2	188.85

(五) 地表變形觀測：

■ **地表變形帶前緣顯著的地形崖（escarpments）**

九二一地震斷層作用所引致的地表變形，最常見且顯著的構造即是使原本平坦的地表面出現相對高程落差的地形崖（escarpment），這崖由一高、一低的地表

面及銜接這兩地表面的斜坡或垂直壁所構成。除大甲溪及其北邊呈東西向的地表變形帶外，地形崖的崖面大致上朝西，可歸納為基本的三類型：斷層崖（fault escarpment）、似拋物線狀的逆衝崖（parabola-like thrust-escarpment）及單斜狀的褶皺崖（monoclinal fold-escarpment），如圖 3-1-16 所示。集集地震的地形崖以似拋物線狀的逆衝崖及單斜狀的褶皺崖為主，出現在由不同物質所組成的地表，從固結的上新世沉積岩到未固結的全新世沉積物（圖 3-1-17）。此組成物質的差異，加上其他的因素，如斷層幾何上的差異，因而衍生出許多變化的樣貌。地震斷層崖則主要出現在由中等膠結的上新世沉積岩所組成的河床裡（地質調查所，1999 a, b; 黃等，2000），而這些斷層的錯動方式主要以逆移為主，且時帶有左移分量。底下我們回顧集集地震後地表變形帶沿線的地形崖之特徵，順序為由北往南：

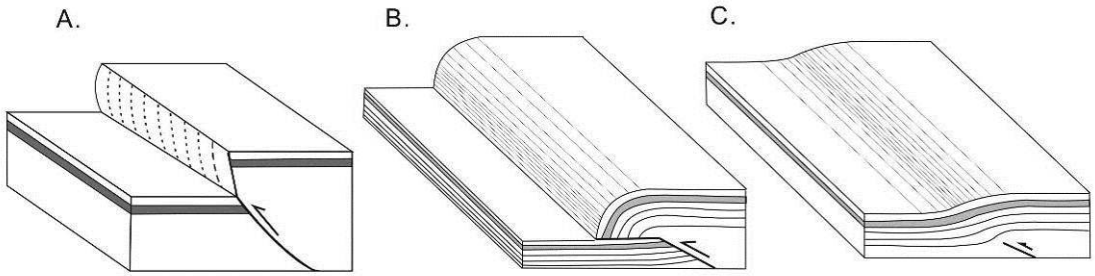


圖 3-1-16 九二一地震地表變形帶前緣基本的三類地形崖。A.斷層崖（fault escarpment）、似拋物線狀的逆衝崖（parabola-like thrust-escarpment）及單斜狀的褶皺崖（monoclinal fold-escarpment）

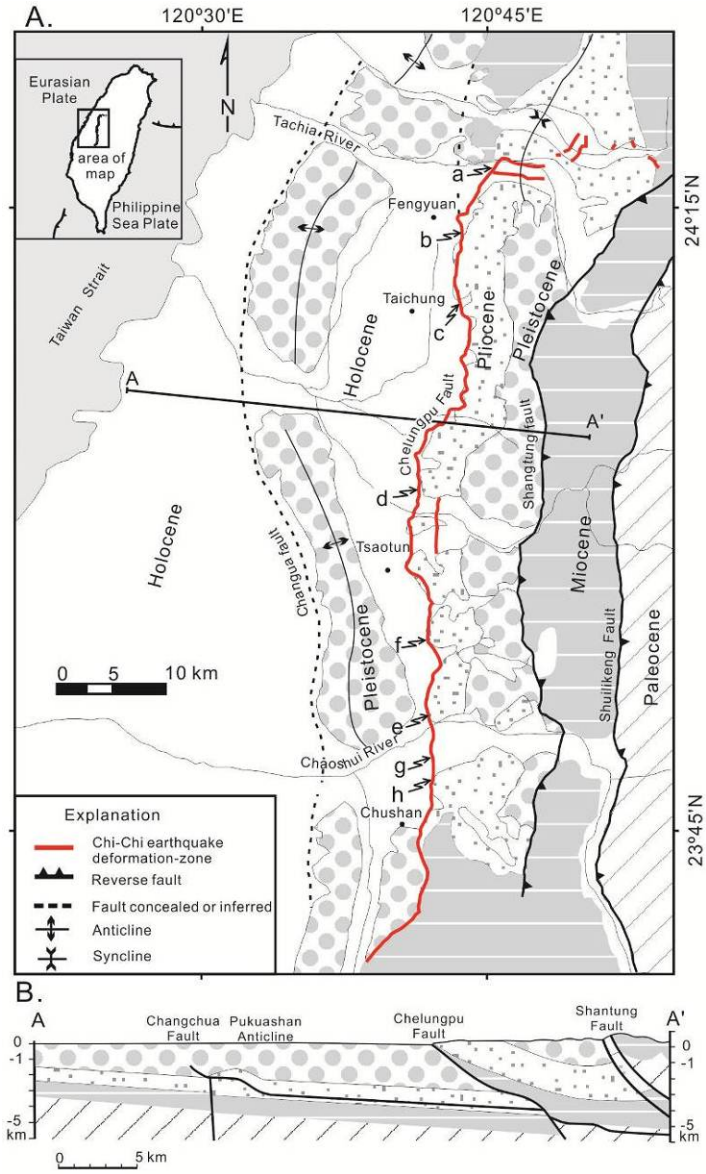


圖 3-1-17 台灣中部九二一地震地表變形帶及其鄰近的地質架構

A. 大甲溪 （位置點為圖 3-1-16 中的標示 a）

集集地震後大甲溪的河床上，形成的一約五公尺高的瀑布，如圖 3-1-18B。河床為中度膠結的上新世沉積岩所組成，離開水道可見塊狀的沉積岩散落在崖下，在崖面上可觀察到一些與層面平行的斷層面，走向約為 NE-SW，傾角為 45°-50°SE，沒有指準可供錯移量的判識。由瀑布處沿崖往東北行，河道為鬆散未固結的氾濫平原的沉積物所覆蓋，圖 3-1-18A 的位置約離瀑布 600 公尺，崖高仍有 4.5 公尺，但崖貌明顯與瀑布不同，上覆沉積物厚約 2-5 公尺，可見固結較好的上新世沉積岩出露。

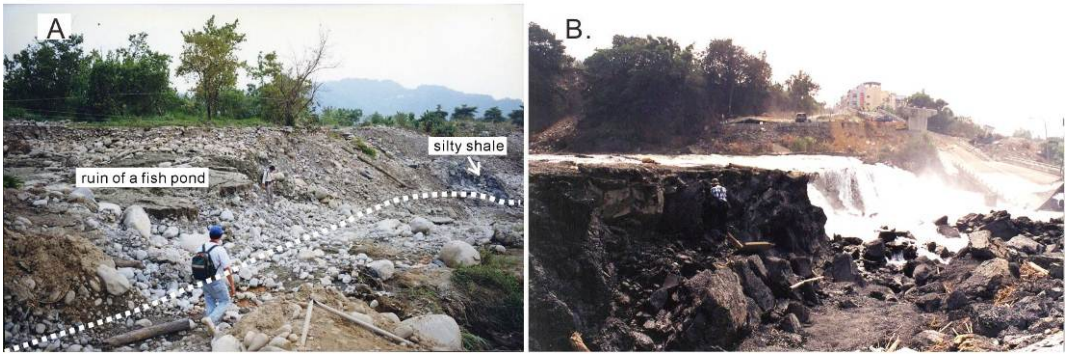


圖 3-1-18 大甲溪河床上九二一地震引致的地形崖。A.B.兩地約離 600 公尺。

B. 牛欄溪 （位置點為圖 3-1-16 中的標示 b）

牛欄溪在豐原東南方約 1.5 公里的位置。圖 3-1-19A 和 B 相隔約 50 公尺，圖 3-1-19B 中的崖坡約 30 公尺寬，總抬升量約 3-4 公尺，其中溪床有兩處較明顯的落差，一處為 0.9 公尺，另一處為 15 公分，其餘的量為撓曲變形所概括。溪床上新鮮出露的岩石為暗灰帶藍的頁岩，有一走向 NNE 傾角為 20°E 的錯動面，其上的斷層擦痕(slickensides)指示該斷層以走向滑移為主。根據該處頁岩呈高度剪動及破碎狀及含水時似斷層泥般地黏著，研判為約 10 公尺寬的舊斷層剪切帶。在牛欄溪北邊 50 公尺的崖有戲劇性的變化，以砂質為主的地面，遭抬升約 2.5 公尺，鬆散的沉積物散落在崖坡下，完全無法定位斷層出露的位置。



圖 3-1-19 牛欄溪及近處的九二一地震引致之地形崖。A.B.兩地約離 50 公尺

C. 大里溪 （位置點為圖 3-1-16 中的標示 c）

大里溪的集集地震地形崖出現在台中東邊約 3 公里處，該處粉砂質泥岩遭錯動抬升成兩階（圖 3-1-20B），泥岩上覆蓋有薄層的礫石，西側階崖約 2.1 公尺高，可見斷層面，其走向 NW-SE，傾角 85°E，東側階崖約 1.1 公尺，為礫石及流水覆

蓋，無法量得斷層面的位態。這兩階往南延後，在河床上即合併為一階，但全為礫石所覆蓋，崖高與兩階的總落差相當，往南沿伸數百公尺崖高仍不變（圖 3-1-20B）；往北延伸，兩階分岔，東側階崖往北崖高漸緩，約於北邊 150 公尺處消失，西側的階崖則以不等的崖高往北延伸，如圖 2-1-20C，為其在大里溪北方 200 公尺外的形貌，為崖高 0.3 公尺的單斜狀的褶皺崖。



圖 3-1-20 大里溪及近處的九二一地震引致之地形崖。A. 大里溪河道北側。B. 大里溪河床。C. 大里溪南岸。

D. 光復國中（位置點為圖 3-1-16 中的標示 d）

在光復國中操場的地形崖相較複雜許多，似拋物線狀的逆衝崖及單斜狀的褶皺崖在短距離內重複出現，如圖 3-1-21A。此外，在光復國中操場南邊約 100 公尺處的柏油路上的地形崖，為寬 5 公尺，總高差 1.2 公尺的三階所構成，如圖 3-1-21B，最低階約 0.6 公尺高，其餘兩階各為 0.3 公尺高。



圖 3-1-21 霧峰光復國中及近處的九二一地震引致之地形崖。A.B.兩地約離 100 公尺。

E. 中寮釋迦園（位置點為圖 3-1-16 中的標示 f）

中寮釋迦園的地形崖為單斜狀的褶皺崖的最佳範例，唯開挖 6 公尺深的槽溝仍未見斷層，見圖 3-1-22A、B。

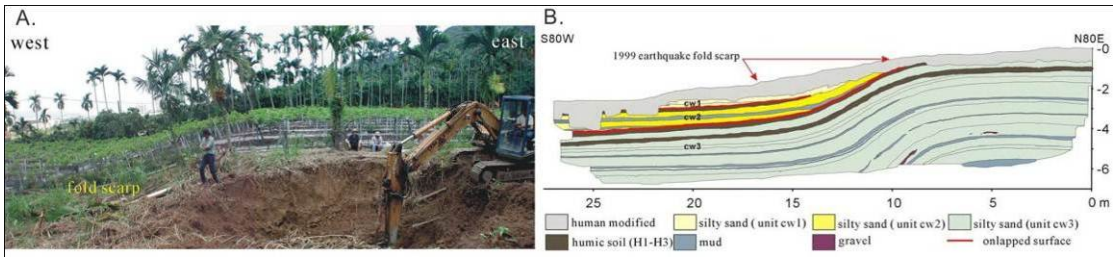


圖 3-1-22 中寮釋迦園的九二一地震引致之地形崖。A.槽溝開挖中。B. 槽溝完成後的垂直剖面圖。(引自陳等人，2007)

F. 名間濁水溪北岸（位置點為圖 3-1-16 中的標示 e）

圖 3-1-23A、B 中的地形崖出現的地點皆在南投名間，分隔有 1 公里遠，兩處的地形崖的形貌雷同，如同在單斜狀的褶皺崖頂部多了道隆陞脊。

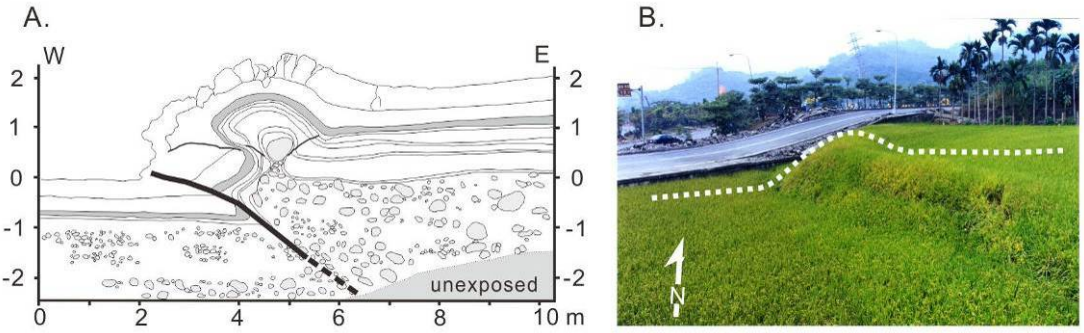


圖 3-1-23 名間地區的九二一地震引致之地形崖。A.B.兩地約離 1 公里。(圖 A 引李等人 2007 文章中的圖重繪)

G. 水底寮濁水溪南岸（位置點為圖 3-1-16 中的標示 g）

圖 3-1-24 中為在水底寮的地形崖，其有近乎類似拋物線狀的逆衝崖之特徵，崖高 2.5 公尺，崖坡的曲度往其西緣越趨增加，且其與地面的灌溉油道急遽交接，約呈 45°-90°。



圖 3-1-24 濁水溪南岸水底寮的九二一地震引致之地形崖

H. 竹山他里溫（位置點為圖 3-1-16 中的標示 h）

圖 3-1-25C 的地形崖為竹山槽溝開挖前的地表樣貌，崖的南半側剖面較似拋物線狀的逆衝崖的特徵，崖的北半側剖面則較似單斜狀的褶皺崖的特徵，圖 3-1-25B 為竹山槽溝的南牆垂直剖面，可見斷層上盤的土層沿地表面逆衝覆蓋在下盤土層上，而圖 3-1-25B 北牆垂直剖面，地表的土層雖為次要斷層所錯動，但整體仍以褶曲為主。

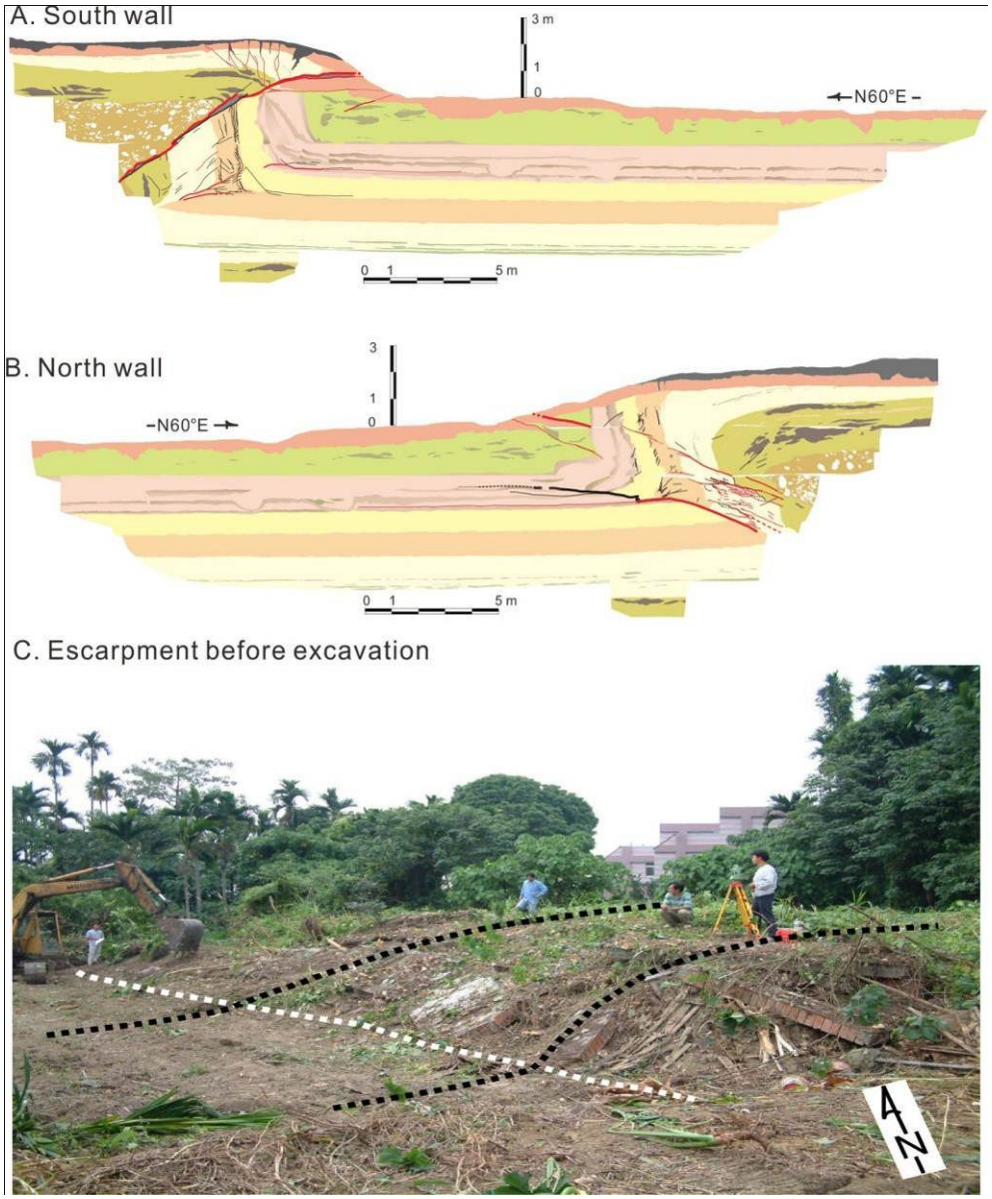


圖 3-1-25 濁水溪南岸竹山他里溫的槽溝剖面及開挖前的九二一地震引致之地形崖

集集地震地表變形帶前緣顯著的地形崖有斷層崖、似拋物線狀的逆衝崖及單斜狀的褶皺崖三種基本的類型。主要以似拋物線狀的逆衝崖和單斜狀的褶皺崖為

主，斷層崖相較罕見，其它的衍生型如圖 3-1-26B 及 E~L。藉由河床的基岩所出露的斷層崖，與其鄰近表層未膠結沈積物所出露的地形崖相連接的現象，可證實這些地形崖應皆為斷層作用所造成，僅因覆蓋材質不同所致。而不同形貌的地形崖則可能受控於斷層的形態、地下岩層的岩性與層態，以及地表上覆蓋層的岩性。

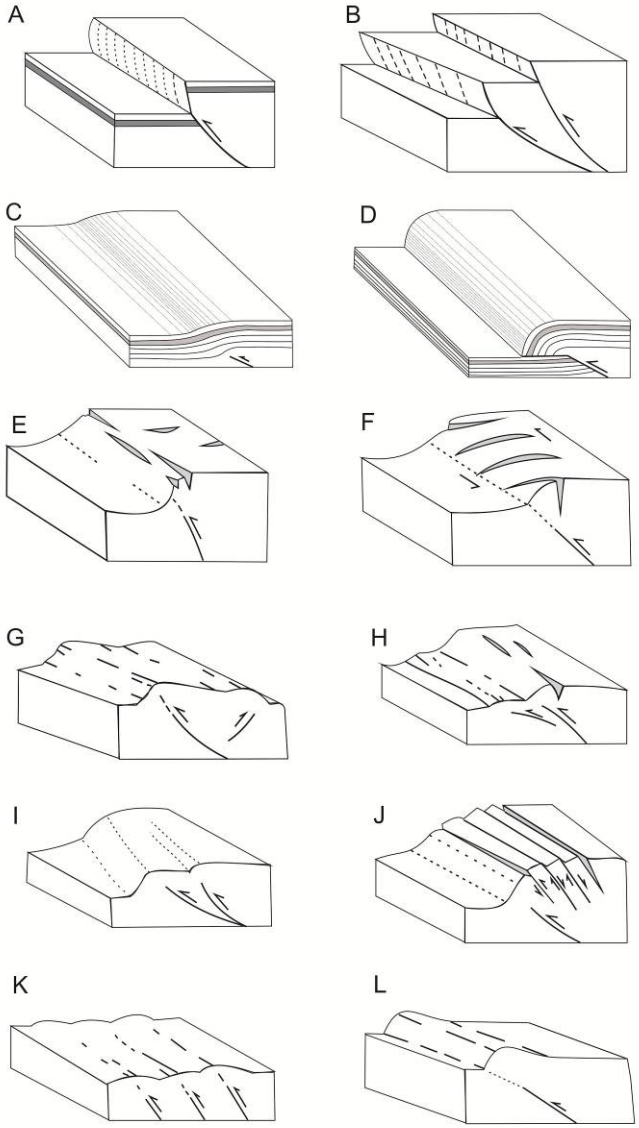


圖 3-1-26 九二一地震地表變形帶前緣地形崖的形貌

■ 地表變形帶

A. 豐原中正公園的地表變形

中正公園位在西部麓山帶的前緣，沿向西流的旱溪谷而建，東側由兩支流匯聚成旱溪，旱溪谷在公園的範疇內約 150-250 公尺寬，谷底為厚約 2-3 公尺的沖積

層所覆蓋，底下為上新世的沉積岩(Kelson 等人，2001)，谷兩側的小丘也由上新世的沉積岩所組成。先前已有數組的地質學家記錄了豐原中正公園這寬約 330 公尺的地表變形帶，這些地質學家包括 Kelson 等人(2001)、董等人(2003)及地質調查所的團隊(2000)。這地表變形帶的東西界為一組面向不同的地形崖所界定，見圖 3-1-27B，西側的地形崖面向西，崖高約 4.5 公尺(見圖 3-1-28)，東側的崖面向東，崖高約 1 公尺(見圖 3-1-29)，其中出現有開張的裂縫(見圖 3-1-30A)、振幅約 15-30 公分的褶皺及高程差為數十公分的高角度斷層(見圖 3-1-30B)。離開這變形帶，地表未察覺變形。大體上，大部分的調查者僅針對谷底作調查，董等人(2003)同時對谷南側小丘頂部的住宅社區的人造物進行檢查，發現在此處有一走向 N12°E 高差約 10-20 公分的單斜狀褶皺崖。此外，住宅區的建築物往公園的西邊擴展，公園的南側及東側共有三個社區，地震後變形帶內的建築物多有受損。根據台灣國家地震工程研究中心(NCREE, 2000)的報導，建築物受損最嚴重的位置在變形帶的西緣，見圖 3-1-28A。

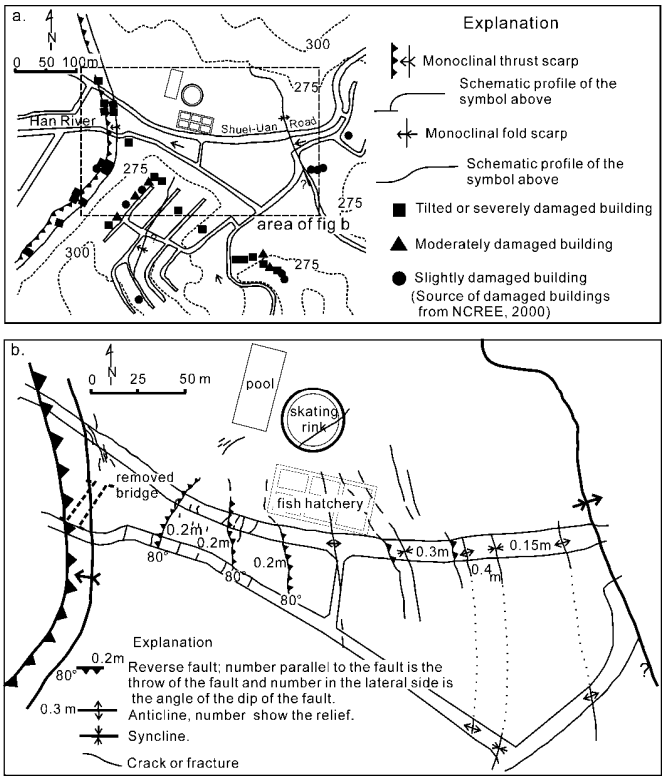


圖 3-1-27 豐原中正公園九二一地震地表變形帶及其中構造分布和建築物破壞情形

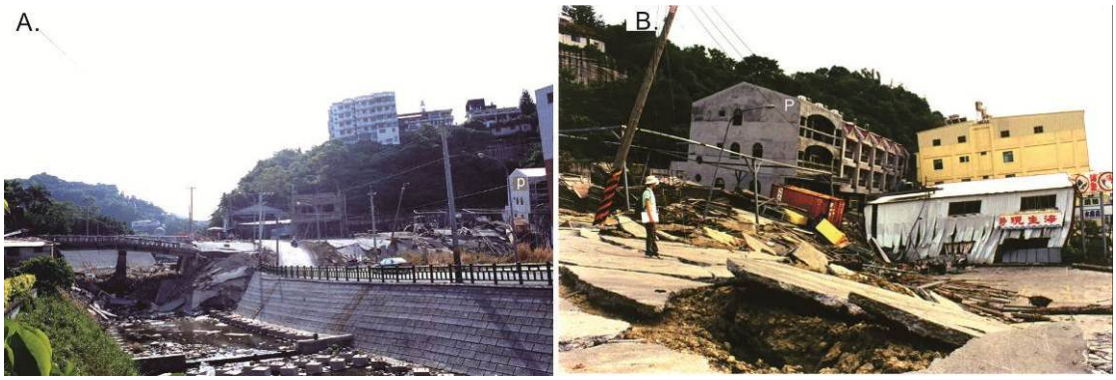


圖 3-1-28 豐原中正公園九二一地震地表變形帶西緣主要地形崖及人造建物損的情形。崖面朝西，崖高約 4.5 公尺。圖 A 及 B 中標示 P 的建築物為同一棟



圖 3-1-29 豐原中正公園九二一地震地表變形帶東緣的地形崖。崖面朝東，崖高約 1 公尺。圖 A 與 B 中標示的 X 及 Y 為相同的位置點



圖 3-1-30 豐原中正公園九二一地震地表變形帶中的構造，A、B 兩圖皆向西邊拍攝。A.為旱溪南岸柏油路上數道開張的裂縫。B. 為旱溪南岸堤防為高角度斷層錯動的現象，斷層的東側遭抬升約 20 公分

豐原市、潭子鄉：參考地調所(2000) 豐原市、潭子鄉地表破裂及露頭點位置

圖(圖 3-1-31)及航照(圖 3-1-32)，選中正公園進行現勘，2000 年於中正公園因斷層通過抬升約 1 至 6 公尺，而造成房舍傾倒（圖 3-1-33.34.36）。於 2011 年多數倒塌房舍已重建(圖 3-1-35.37）。

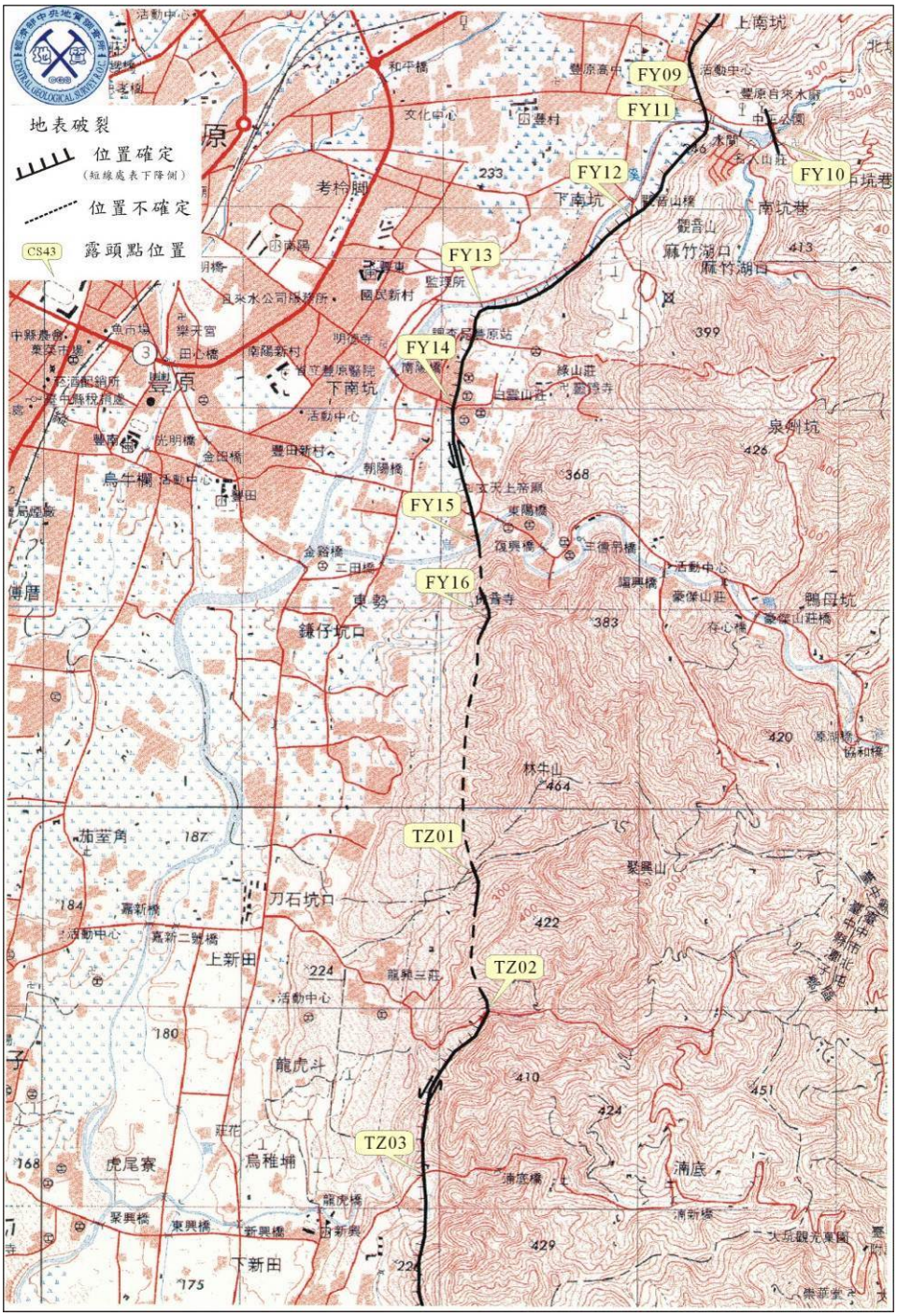


圖 3-1-31 豐原市、潭子鄉地表破裂及露頭點位置圖



圖 3-1-32 豐原市、潭子鄉區域航照

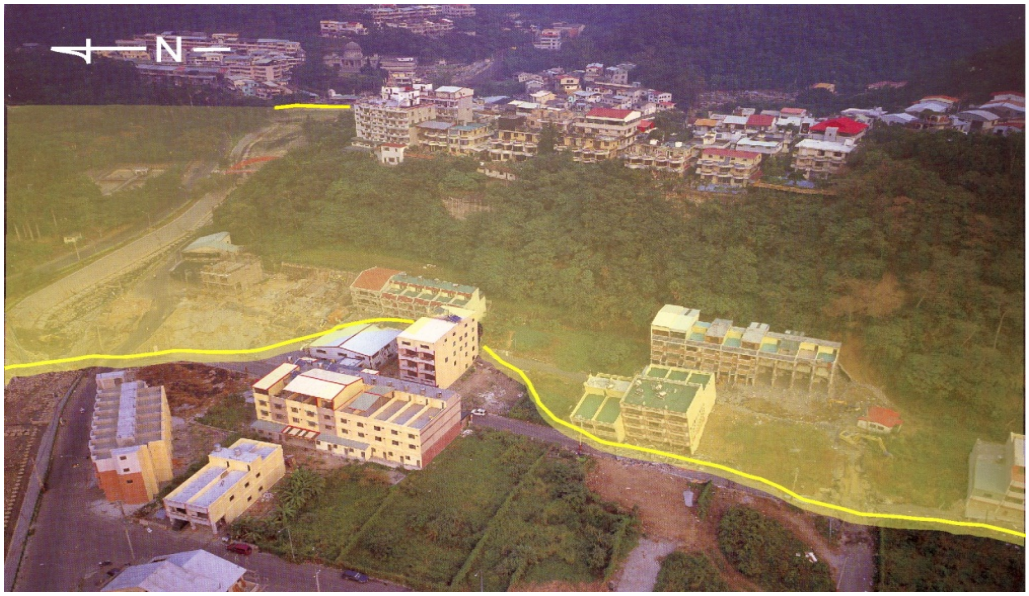


圖 3-1-33 空拍照片，圖中斷層跡通過之兩棟建築物有不同的變形結果(連永旺)

2000 年



圖 3-1-34 北側房屋，斷層跡由屋後繞過(劉桓吉)

2011 年



圖 3-1-35 北側房屋現況



圖 3-1-36 南側房屋，斷層跡造成房屋傾斜變形(劉桓吉)



圖 3-1-37 南側房屋周圍已進行重建

B. 竹山他里溫地表變形的情形

竹山他里溫地表變形帶位在921地震破裂跡的南端，為圖3-1-17中濁水溪南側標示f的位置。此處的變形帶大約的東西界，以點線標示於圖3-1-38中，平均的寬度約有 80 公尺，圖上帶有刻度標記的粗實線為地表變形帶前緣顯著地形崖崖坡坡底的位置，地形崖的高差約1-2公尺，變形帶緊臨麓山帶的西緣，貫穿本區。

竹山槽溝即在圖3-1-38中A的位置，圖3-1-39A為其與他里溫地區的空照圖，圖3-1-39B為槽溝的特寫，黑色點線為地形崖的位置，槽溝中的斷層帶寬約4-5公尺，見圖3-1-26A、B，此斷層帶約調節3.4-4公尺的地震地表水平位移量的一半，其餘的一半為變形帶的其它部份所吸收。

圖 3-1-38 B 的位置在九二一地震前原本為座落一完整的三合院，其約為在竹山槽溝的東北方 60 公尺處，地震後東西廂房倒塌，不久後遭移除，有許多的裂縫及隆起現象出現在柏油庭院的地表，見圖3-1-40，三合院的正房也因地基的不等高隆升，而遭變形破壞，隆升的形式以正房長軸的對半處最高，約為 28 公分，且兩側約略對稱，見圖3-1-41，此與庭院地表隆升現象有相似之處。所有的變形構造皆指示水平壓應力的方向為NE-SW向，且在NW-SE方向有足夠的張應力造成張力裂隙。水平壓應力的方向約略與竹山槽溝長軸的方向平行，亦與該處地形崖的延伸方向垂直。

地震斷層的下盤少有明顯變形的現象，圖3-1-38C中的位置座落著另一座三合院，其位在鄰近地形崖的西北方約 30 公尺處，亦即三合院正廳的後方不遠處，崖高約 1 公尺，庭院的柏油地面出現數道裂縫及撓曲，相當的總抬升量為 20-40 公分，延伸方向與地形崖的延伸方向約略平行，且損及房舍。

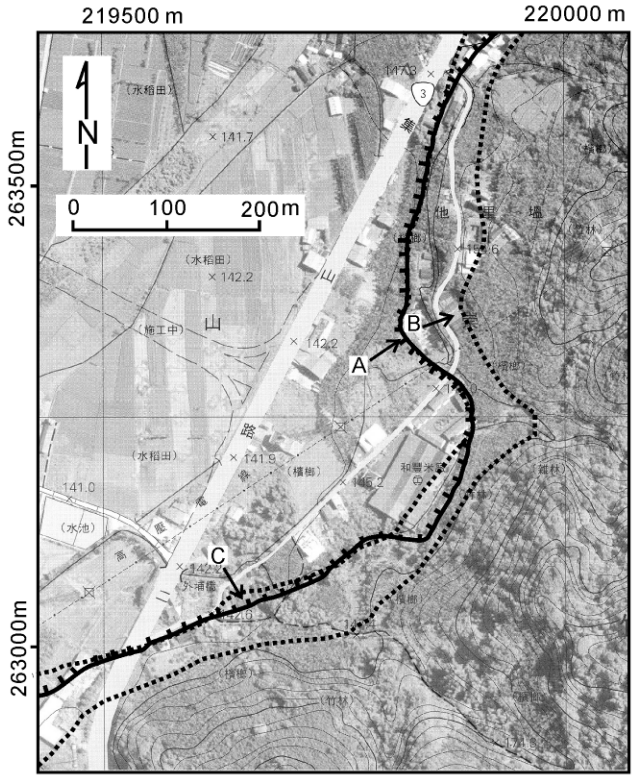


圖 3-1-38 竹山他里溫九二一地震地表變形帶(點線標示變形帶大概的東西界線，平均的寬度約有 80 公尺,帶有刻度標記的粗實線為地表變形帶前緣顯著地形崖崖坡坡底的位置，地形崖的高差約 1-2 公尺。)

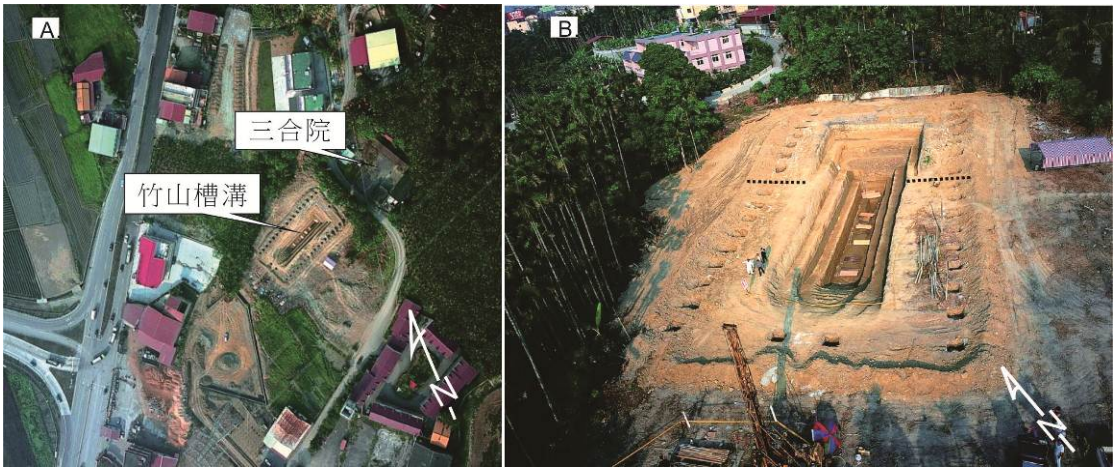


圖 3-1-39 他里溫地區的竹山槽溝空照圖。A 圖中標示竹山槽溝及東北方 60 公尺處的三合院之相對位置。B 圖中竹山槽溝長軸兩錯的黑點線為地形崖崖腳的位置。

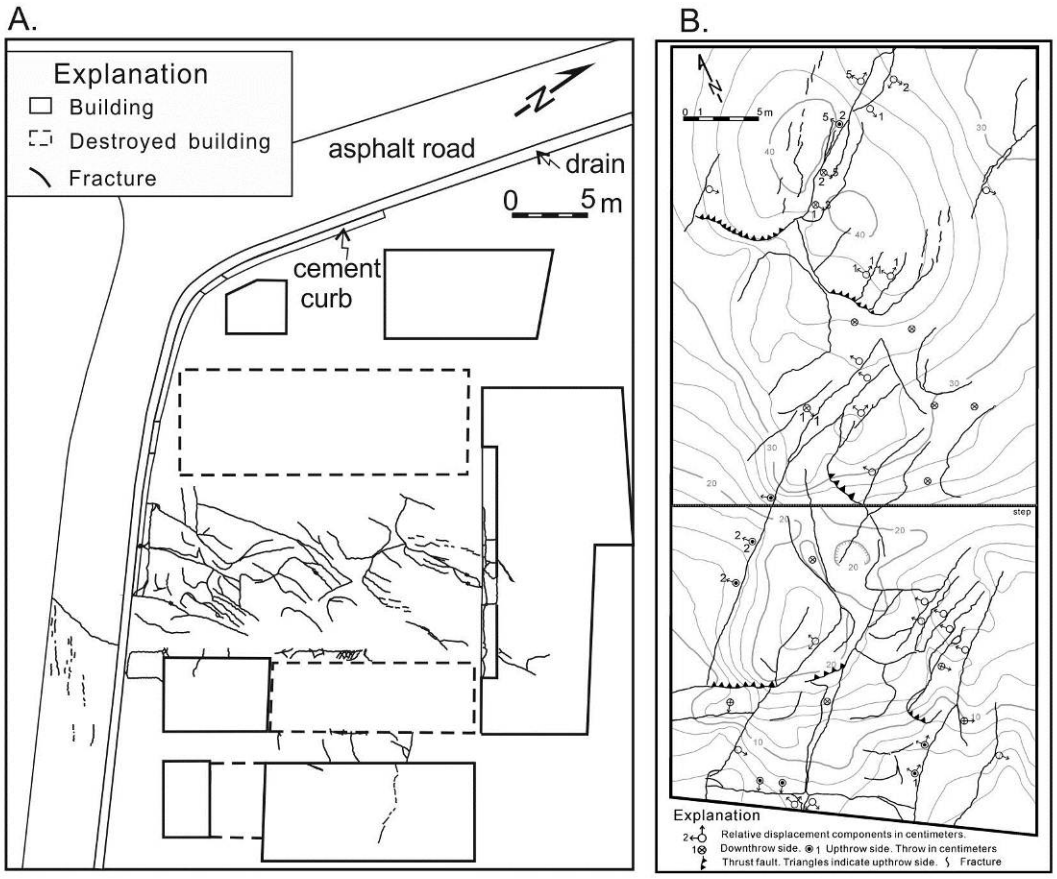


圖 3-1-40 他里溫地區九二一地震斷層上盤三合院中的地表破裂情形。圖 A 的相對位置可見於圖 3-1-37 或圖 3-1-38A。圖 B 為三合院中庭的破裂跡圖，等高線間隔為 2 公分。

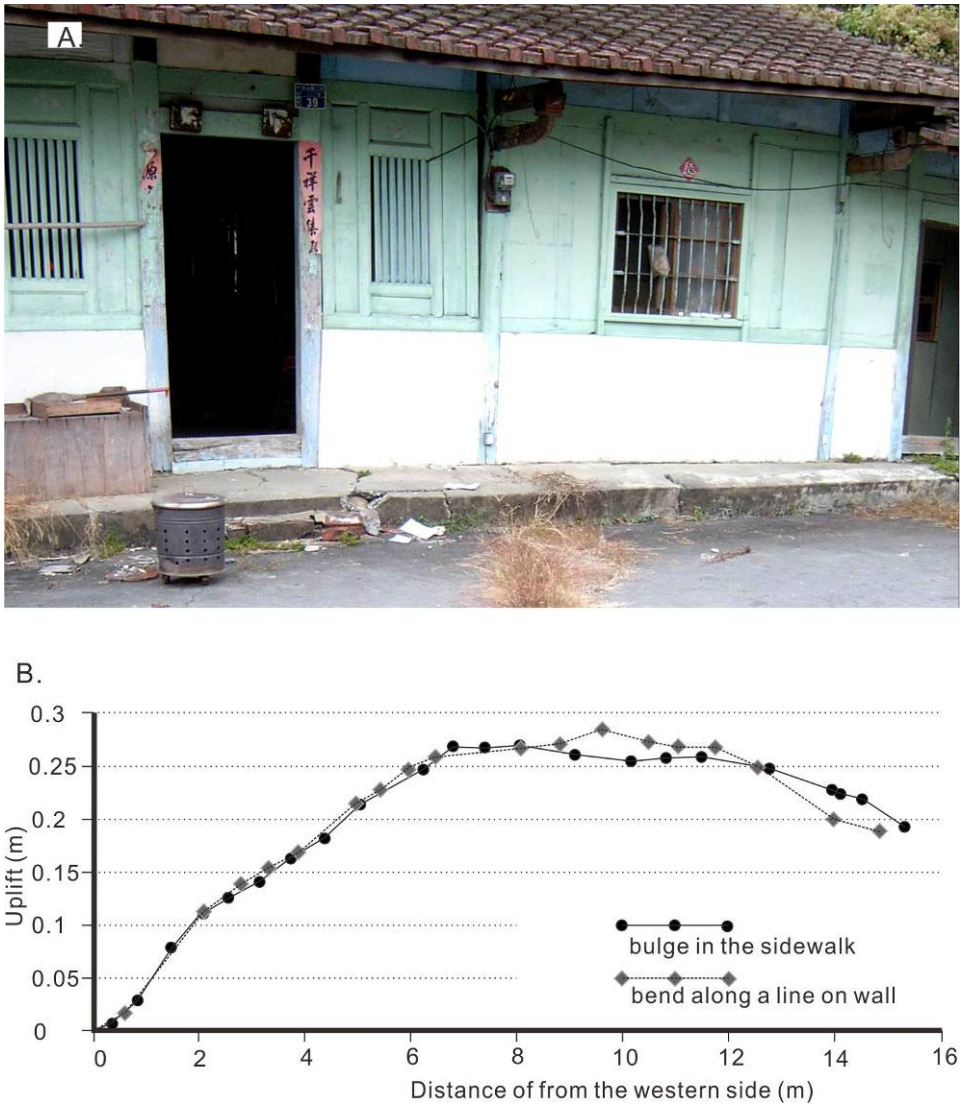


圖 3-1-41 他里溫地區九二一地震斷層上盤三合院的正房遭地表隆升破壞的情形，三合院的位置參及圖 3-1-37 中的 B 及圖 3-1-38A。圖 A 為正房遭地表隆升而拱彎變形的情形。圖 B 為沿正房長軸的相對抬升量，參考點為正房的西端，最大抬升量約為 28 公分。



圖 3-1-42 他里溫地區九二一地震斷層下盤三合院的柏油庭院的破壞情形，拍攝方向為東南。柏油庭院出現數道裂縫及被撓曲，相當的總抬升量為 20-40 公分。

C. 台中縣大里市

參考地調所(2000)大里市、霧峰鄉地表破裂及露頭點位置圖(圖 3-1-43)及航照(圖 3-1-44)，選定 DL01、DL02 進行現勘，其中 DL01 於 2000 年車籠埔斷層自健行路一排民房下方經過，造成民房損毀情形，此處恰位於斷層由北北西走向轉向東西走向之轉折點(圖 3-1-45)。於 2011 年民眾因房舍結構僅有剛體位移無結構破壞，故民眾自行將其扶正，房舍整體上抬約 1 公尺，並於房舍前後採不同支撐工法(圖 3-1-46~8)。DL02 於 2000 年斷層穿過健行路尾端路面抬升約 2 公尺，造成房屋上下錯移毀損(圖 3-1-49)。於 2011 年民眾自行重建，並採用大樓基礎建設二樓民房(圖 3-1-50~52)。

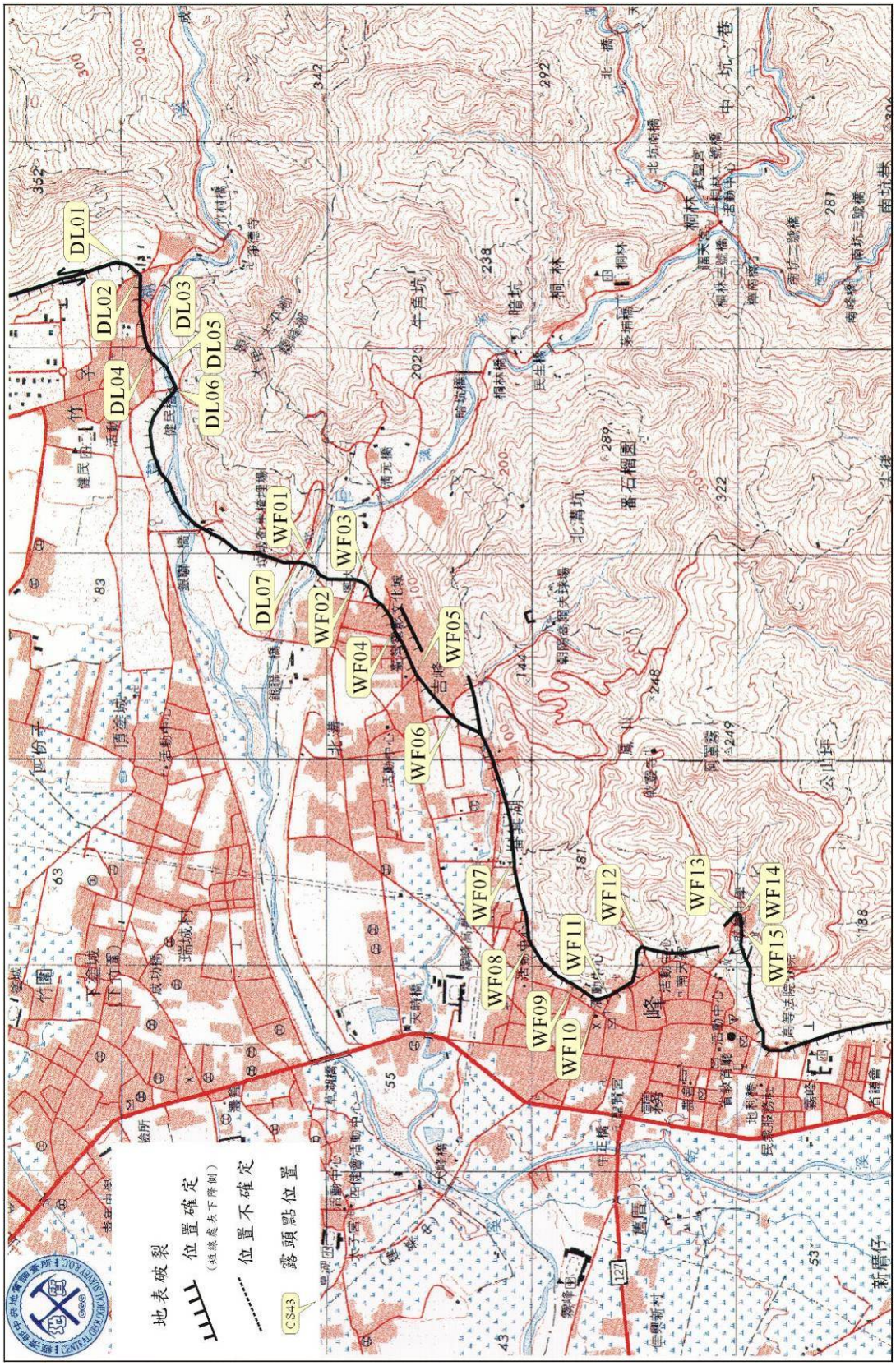


圖 3-1-43 大里市、霧峰鄉地表破裂及露頭點位置圖

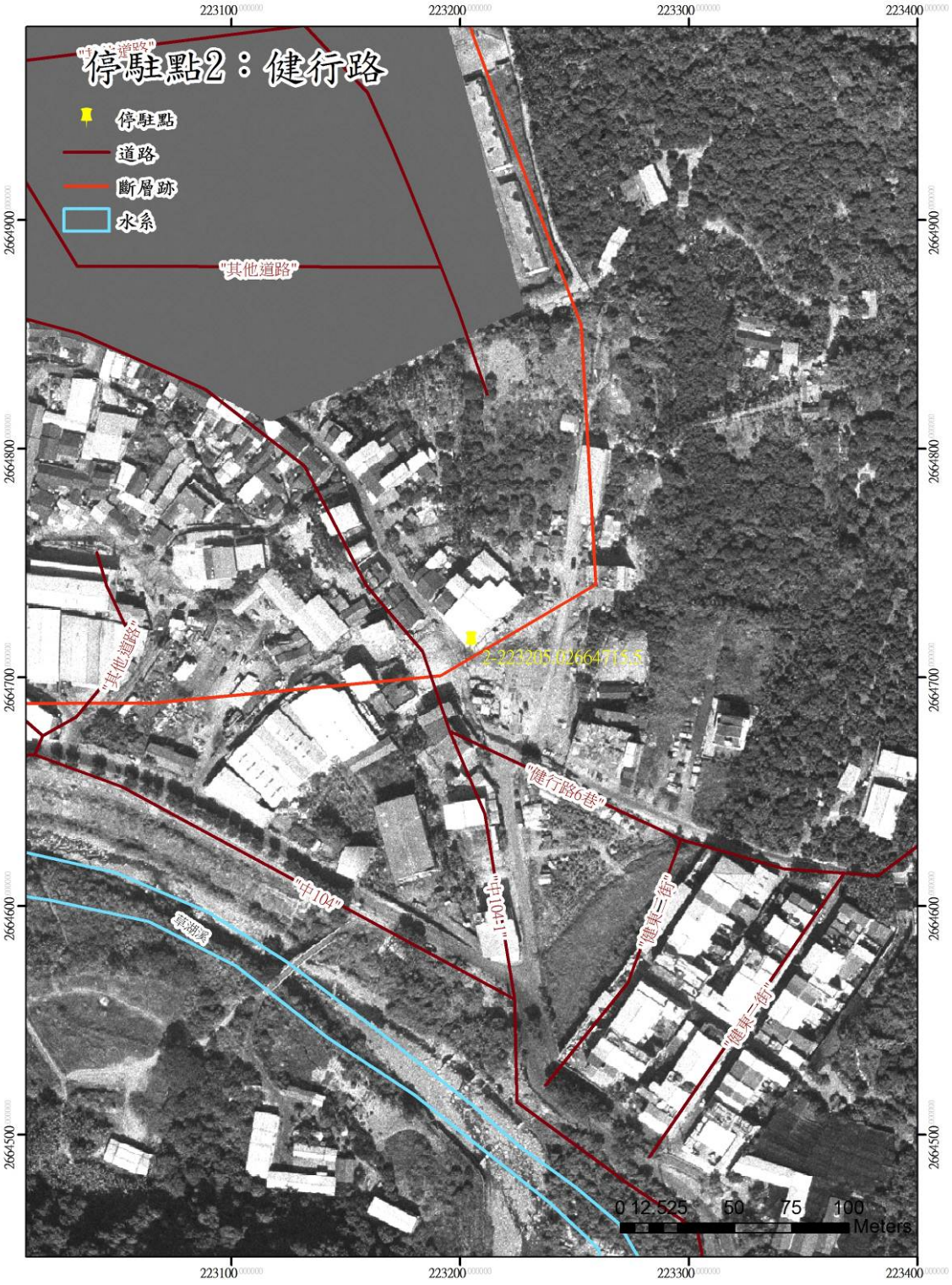


圖 3-1-44 大里市、霧峰鄉區域航照

2000 年



圖 3-1-45 車籠埔斷層自健行路民房下方經過，造成民房損毀情形，此處恰位於斷層由北北西走向轉向東西走向之轉折點

2011 年



圖 3-1-46 民房現況



圖 3-1-47 民房整體抬升約 1 公尺



圖 3-1-48 民房後方僅以 H 型鋼支撐

2000 年



圖 3-1-49 斷層穿過健行路尾端路面抬升約 2 公尺，造成房屋上下錯移毀損

2011 年



圖 3-1-50 斷層穿過健行路尾端路面抬升約 2 公尺現況



圖 3-1-51 斷層穿過健行路尾端，斷層上盤之房屋重建現況



圖 3-1-52 房屋採大樓基礎建設

D. 太平市

參考地調所(2000)太平市地表破裂及露頭點位置圖(圖 3-1-53)及航照(圖 3-1-54)，選定 TP09 進行現勘， 2000 年於一江橋南岸橋頭一棟樓房因斷層自門前處抬升約 4 公尺，造成樓房嚴重傾斜（圖 3-1-55）。於 2011 年民眾因房舍結構僅有剛體位移無結構破壞，故民眾自行將其扶正（圖 3-1-56）。

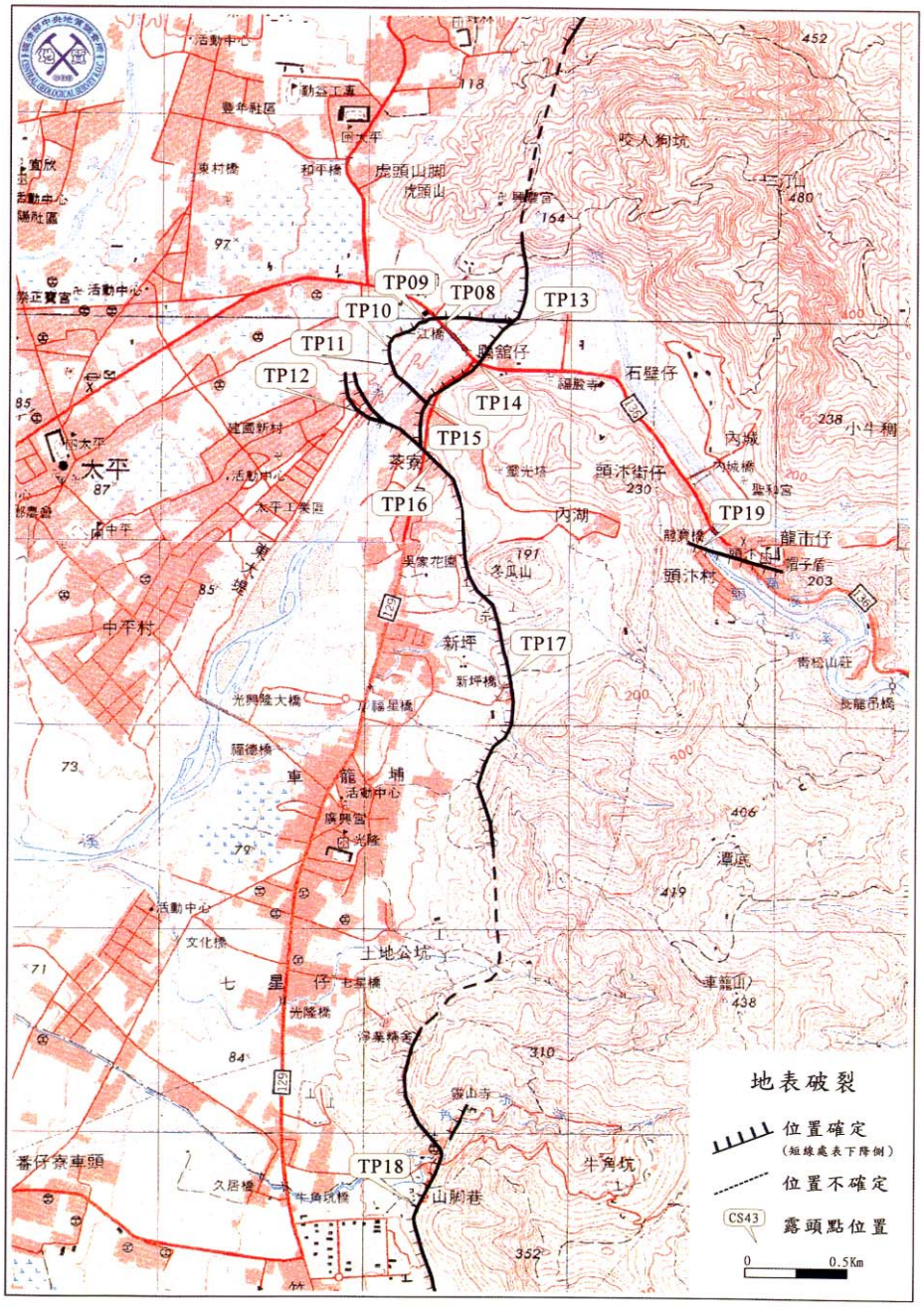


圖 3-1-53 太平市地表破裂及露頭點位置圖

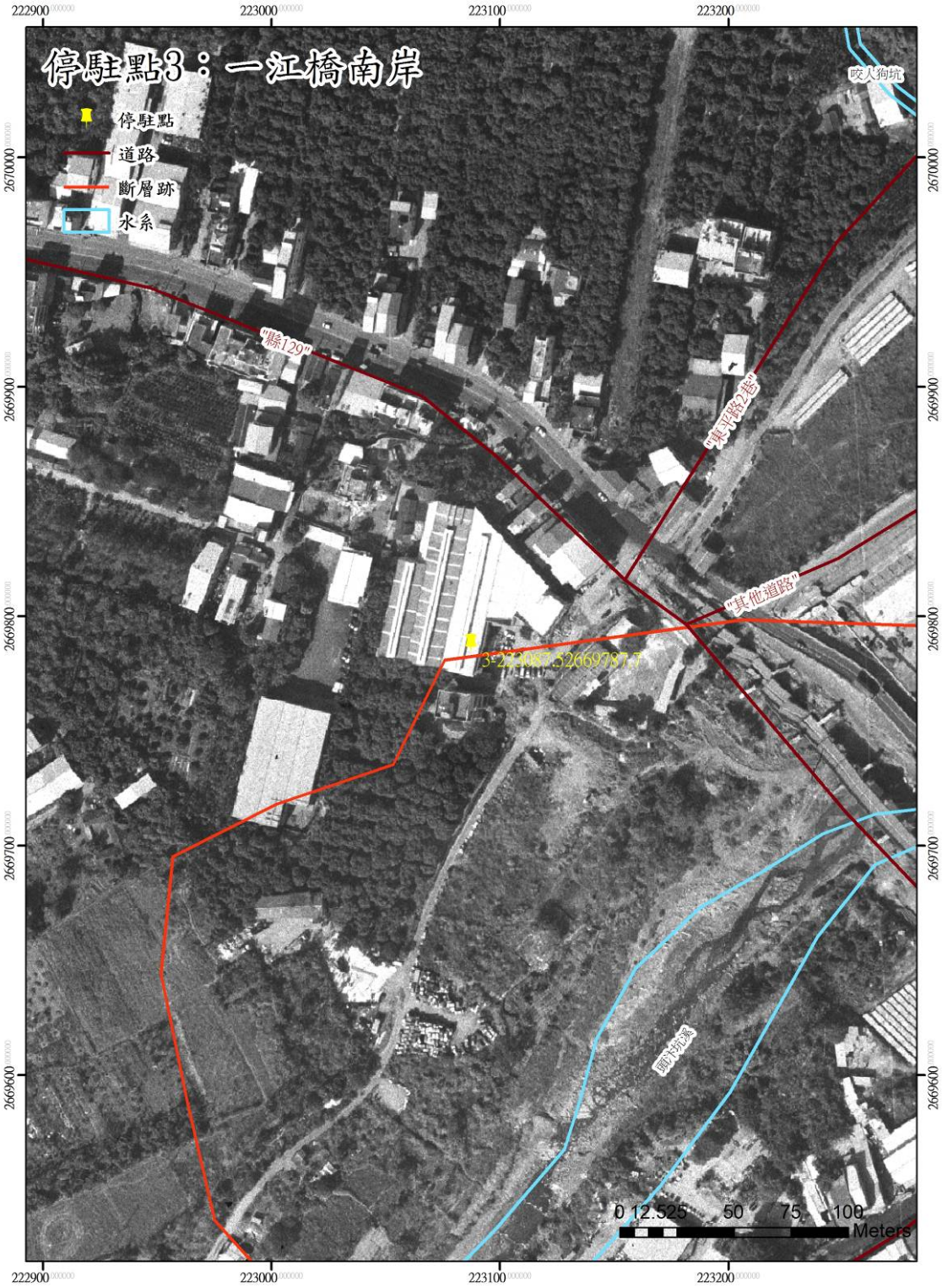


圖 3-1-54 太平市區域航照

2000 年



圖 3-1-55 一江橋南岸橋頭一棟樓房因斷層自門前處抬升約 4 公尺，造成樓房嚴重傾斜

2011 年



圖 3-1-56 民眾自行將其扶正現況

E. 潭子鄉、北屯區、太平市

參考地調所(2000) 潭子鄉、北屯區、太平市地表破裂及露頭點位置圖(圖 3-1-57)及航照(圖 3-1-58)，選定 TP03 進行現勘， 2000 年於廓子坑路在廓子橋南側之路段因斷層通過抬升約 1 至 2 公尺，並左移近 3 公尺而造成房舍傾倒（圖 3-1-59）。於 2011 年 11 間倒塌民眾共有 10 間重建為二樓民房(圖 3-1-60）。

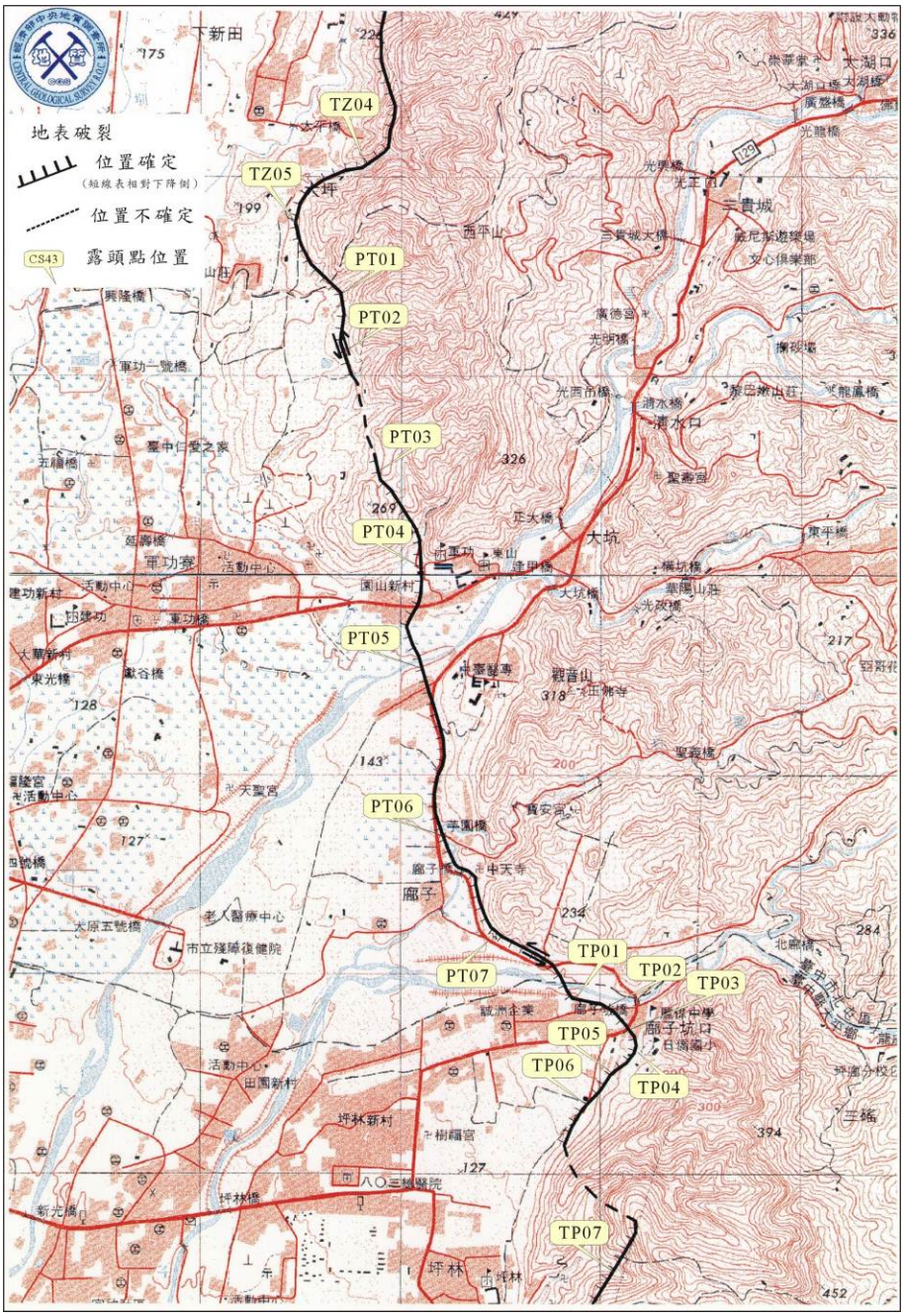


圖 3-1-57 潭子鄉、北屯區、太平市地表破裂及露頭點位置圖

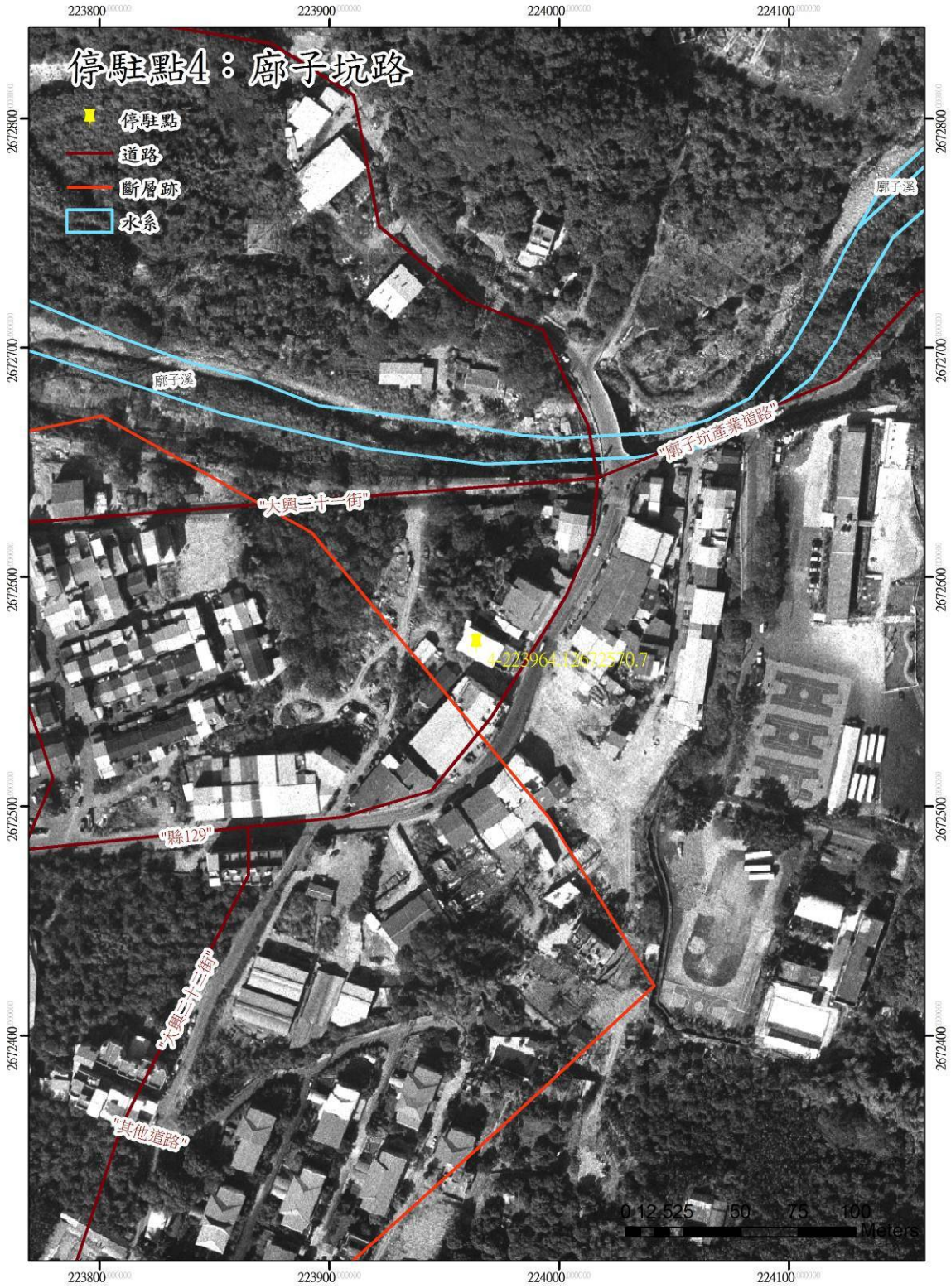


圖 3-1-58 潭子鄉、北屯區、太平市區域航照

2000 年



圖 3-1-59 廊子坑路在廊子橋南側之路段因斷層通過抬升約 1 至 2 公尺，並左移近 3 公尺而造成房舍傾倒

2011 年



圖 3-1-60 11 間民房倒塌民眾共有 10 間重建為二樓民房

(六) 地球物理測定：

參考陳伯毅(2004) 運用地電阻方法探勘結果與槽溝對比結果，找出其對應關係結果顯示，竹山測線位於竹山鎮山崇里竹山秀傳醫院南方(圖 3-1-61)，竹山地區礫石層之電阻率從 300Ω-m 一直可到 1000Ω-m 以上，錦水頁岩則多在 40Ω-m 以下，視電阻率差別大，易於分辨。探測結果顯示：地表下有高電阻率的礫石層，而在距 A 端 12~20 公尺處以及 30~45 公尺處有電阻率不連續面，此二不連續面切斷高電阻率的礫石層，並與地表高度落差一致，研判可能與斷層有關。然而此測線較短，故可見範圍有限。該二區域亦可能是局部的低電阻率構造，故將配合長展距測線 BB'進行分析。

竹山地區槽溝狀況優良，所開挖地點跟角度也非常理想，得到了完整的褶皺與斷層的資料，將槽溝與地電阻剖面相對照，對於斷層位置、走向都能夠清楚的比對出來（圖 3-1-62）。

測線 AA'，距 A 端 30~45 公尺處的低電阻不連續面，與斷層所在位置十分吻合，然而斷層實際的角度比地電阻率圖像略大，應為該斷層面附近正好為礫石與泥岩接觸面所致，電阻率高低差異大的成份，影響了原本斷層在視電阻率圖上的圖像；在測線中段淺部的高電阻區塊，則為地表的高純度砂岩。不連續面在地表的出露處，電阻率則更達到 20Ω-m 以下，此處以斷層泥為主，並富含水分，故電阻率較低。

測線BB'與實際開挖結果比對，除可推斷出斷層所在的位置，測線上盤出露的礫石層也清晰可見。在距B 端 120~130 處所出現的低電阻區及地表高程差，可能為古斷層活動區塊。根據兩者比較結果，在地表觀測到的礫石層與地電阻的剖面相似度高，故此斷層兩側的礫石層在地電圖上所顯現出來的可信度頗佳。對照整體地表下的高電阻區塊，被兩個低電阻率區塊截斷成為兩階，共三層的圖像，並規則遞減，推測此高電阻率區塊應為同一層的礫石層，因受斷層活動而有不同程度的抬升，並受不同程度的侵蝕。該測線隨後也如同預測在南側開挖到礫石，證實地電率剖面結果的可靠度非常高。

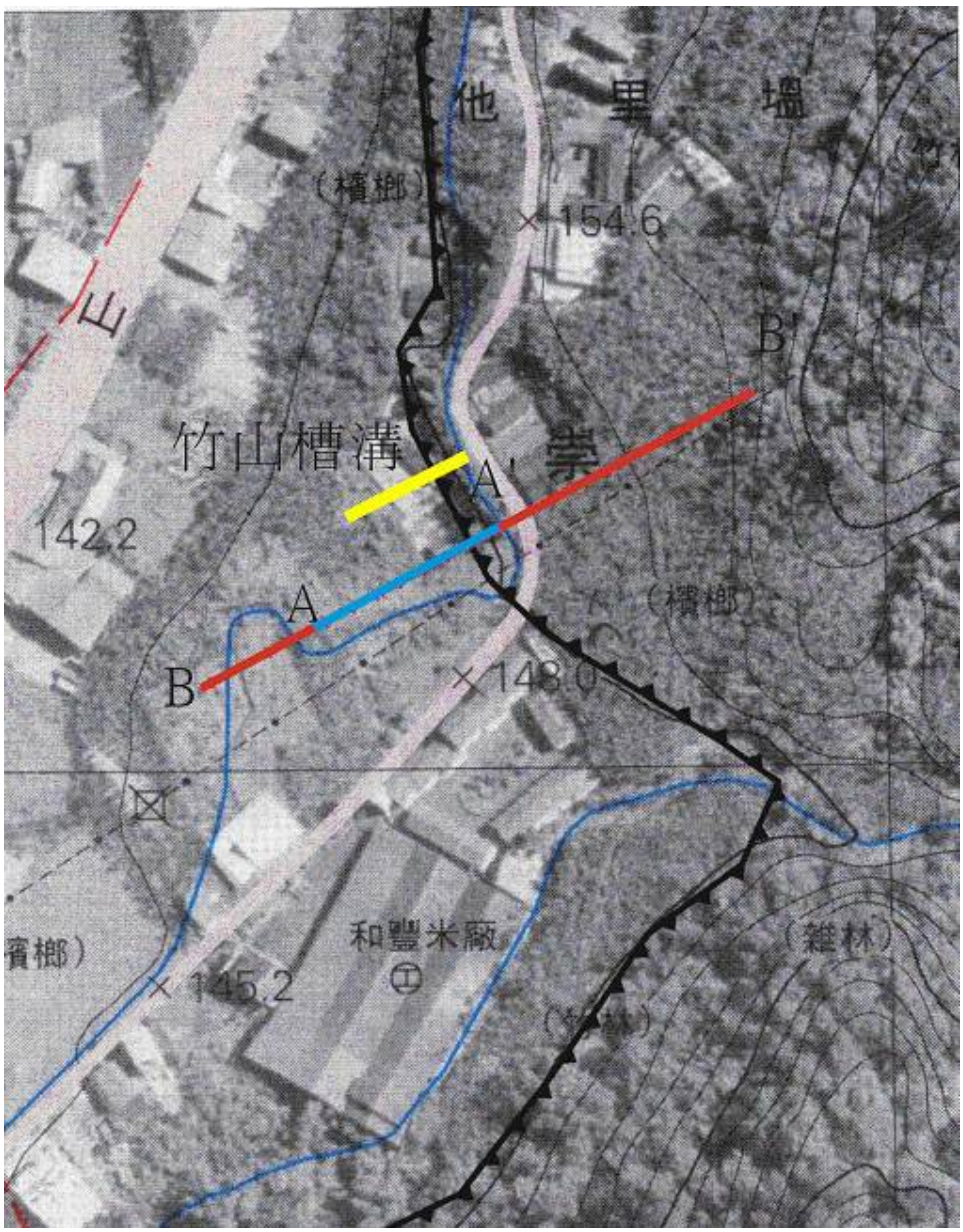


圖 3-1-61 竹山 A-A 與 B-B 測線位置圖 (陳伯毅，2004)

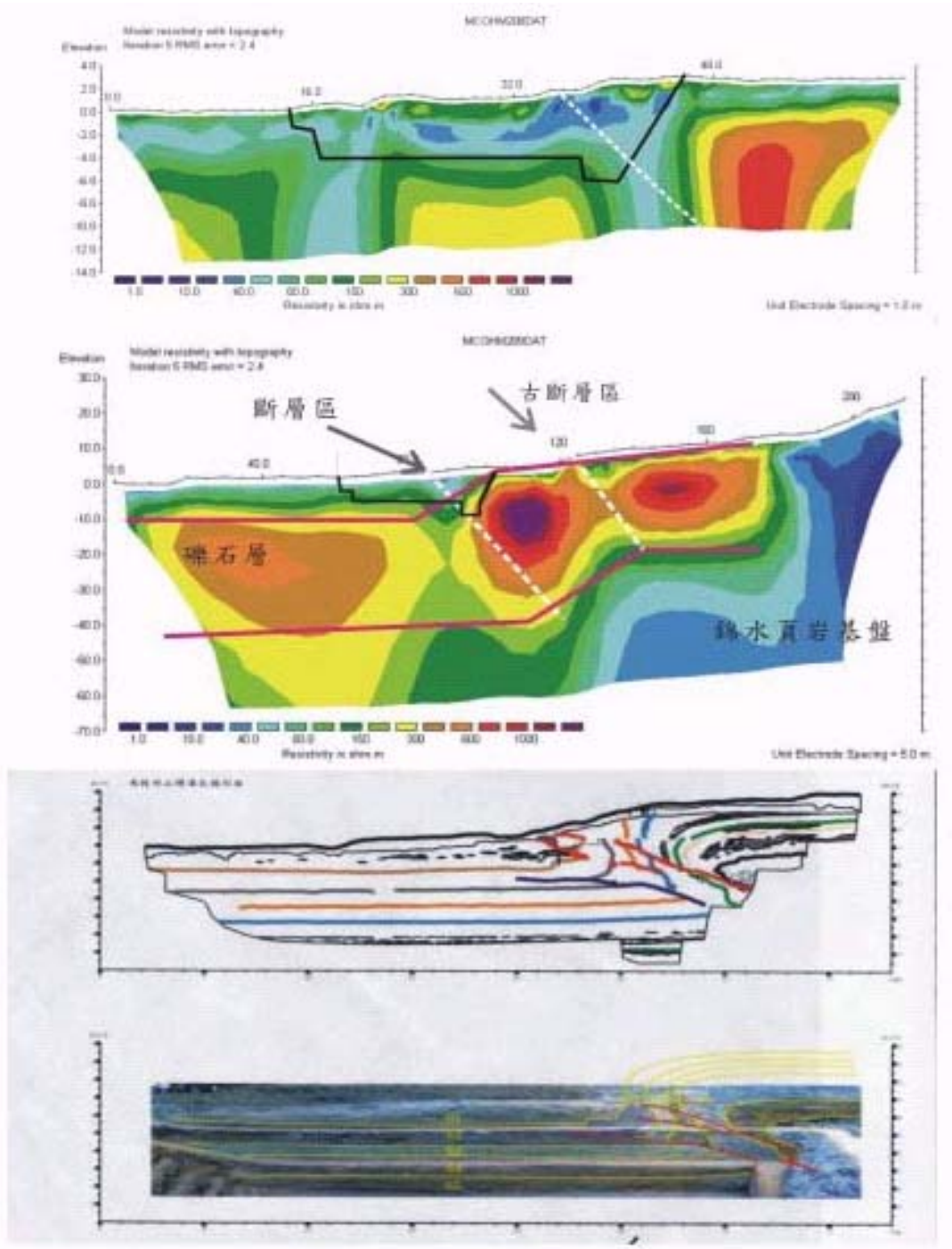


圖 3-1-62 竹山地區測線與槽溝比較 (陳伯毅，2004)

1-2. 新城斷層

(一) 斷層特性：

彙整過去文獻，透過現地調查、地表地形、地球物理及鑽井資料，以了解新城斷層命名歷史、斷層跡位置、地下分布情形及地下材料，如表 3-1-4 所示，並擷取本研究密切相關之地質資料如斷層面傾斜角度、可能滑移量等。

參考 Chung, C.T.(1963)，可知新城斷層、青草湖向斜與寶山背斜的相互關係，如圖 3-1-63.64 所示，並有一寶山向斜深井圖 3-1-65，可惜並未鑽穿新城斷層。新城斷層之槽溝剖面如圖 3-1-66

表 3-1-4 新城斷層過去文獻

現地調查

作者	年份	研究方法	研究成果
鳥居敬造與吉田要	1931	現地調查	繪製地質圖並標定新城斷層為逆移斷層。
丹桂之助	1933	現地調查地表地形	根據河谷及水系形態推斷新城斷層的地形特徵包括:（1）谷頭高度差異；(2）溪谷流向突然呈直角轉彎；（3）頭重埔台地上具有 50 公尺高的斷層崖；(4）在頭前溪上游露頭出露基岩，而下游被砂礫覆蓋。
Ku(古兆禎)	1963	現地調查地表地形	新城斷層截斷石碑台地所有階地，崖高 50 至 60 公尺，東南側為上升側。
Tang, C.H.(湯振輝)	1968	現地調查地表地形	斷層北段位於新竹縣關西鎮西南方鳳山溪與頭前溪之間的飛鳳丘陵，呈東北東走向，長約 12 公里；南段位於頭前溪中正大橋附近與苗栗縣頭份鎮北方下坪之間的竹東丘陵，呈東北走向，長約 16 公里，兩段合計約 28 公里，觀察特徵為：(1）陡崖突降及河流突彎的傾向與斷層線相符；(2）斷層線谷沿著斷層的西南端發展；(3）斷層線崖之傾向與斷層東北端延展方向相當吻合；(4）頭前溪河床寬度突變的位置與斷層東北端的位置相符。
Tang and Hsu (湯振輝與徐兆祥)	1970	現地調查地表地形	調查新城斷層切過寶山背斜的西北翼，斷層面向東南**傾斜 40 度**。
Hsu and Chang(徐鐵良與張憲卿)	1979	現地調查	指出斷層從關西延伸至頭份，其升側為上新世卓蘭層，降側為更新世頭嵙山層香山相及部份非紅土階地堆積層。
Huang(黃	1984	現地調查	野外觀察結果發現新城斷層沿線有河岸錯移、彎曲及

鑑水)			轉向的現象，而斷層存在的主要證據包括：(1) 切穿紅土台地堆積層高約 50 公尺的直線斷層崖，為東南側卓蘭層逆衝於西北側頭嵙山層之上；(2) 晚第 4 紀紅土礫石層被錯移；(3) 斷面走向北偏東 38 度，向東南**傾斜 35 度**，上盤有拖曳現象；(4) 斷層的變位量以竹東關東橋附近為最大，往兩端依次遞減。 地球物理調查繪製三個剖面，結果顯示新城斷層的**傾角約為 30~40 度**，並以錦水頁岩為滑動面向上逆衝至地表，並造成上盤的第二級褶皺(second order folding)
石再添等	1985	現地調查	發現在南湖變電所北方 200 公尺處的露頭有二小斷層，斷層面向東傾斜**約 40 度~50 度**，隆起側有拖曳構造，地層落差由上向下增大，具斷層活動的累積性；在大崎口站南方的露頭有三條小斷層，斷層面向東傾斜 43 度至 50 度，隆起側亦有拖曳構造。
何春蓀	1986	現地調查	新城斷層位在西部麓山帶地質區其東邊有寶山背斜，西側有柑子崎向斜，這些構造與竹東斷層及新城斷層皆為相互平行。
張徽正等	1998	現地調查	根據調查判定為第二類活動斷層。
盧詩丁等	2000	現地調查 地表地形	頭前溪以南至頭份東北這一段，走向約為北偏東 40 度至 50 度，斷層**傾角約 40 度**向南，野外斷層露頭十分明確在頭前溪河床可觀察到斷層帶、斷層泥及引曳褶皺等現象，同時在頭前溪南側的階地存在高約 50~60 公尺之斷層崖。對於頭前溪以北部分，在溪北岸的斷層兩側均出露楊梅層，岩性差異不大，同時野外露頭的狀況不佳，並未觀察到斷層相關的證據。
李元希等	2002	現地調查 地表地形	頭前溪南岸發現斷層錯動之證據，此顯示該處新城斷層經過更老的河階群，並建議將本斷層劃歸為第一類活動斷層。
石同生等	2002	現地調查	認為新城斷層以逆移斷層為主，斷層北起頭前溪中正大橋附近，向西南延伸至下坪，可能於當地結束或向南轉向，斷層總長約 15 公里。斷層面走向約北東 50 度，傾向東南**約 35 度**。
陳文山等	2003	現地調查 地球物理	究於園區內篤行營區中開挖兩槽溝，均發現新城斷層已上衝至地表，可知新城斷層在園區紅土面形成後，已至少因斷層造成 **18m 位移**，推斷其發育時間應年輕於兩百年，因此推論新城斷層應為第一類之活動斷層。

地表地形

作者	年份	研究方法	研究成果
Chang（張錫齡)	1972	現地調查地表地形	新城斷層上下盤均為頭嵙山層，其東北端在飛鳳山丘陵可能為新竹斷層所截切，西南端在頭份附近遇斗煥坪斷層而錯移。
余水倍等	1997	地表地形	由 1994 年至 1997 年的 GPS 觀測發現,新城斷層仍然維持東側北移的左移性質，說明新城斷層可能有無震（a-seismic）左移潛移現象。
游明聖與蕭謙麗	1997	地表地形	分析河階位移及水平測量值指出新城斷層以逆衝性質為主,但可以橫移斷層的終端平衡模式解釋整個系統。
楊貴三與蔡怡真	2003	現地調查地表地形	新城斷層在工研院西南方的柯湖里切過高位階地形成高約 40 公尺的斷層崖，並在斷層上盤形成小背斜。
Chen et al.	2004	現地調查地表地形	以地形學研究認為新竹斷層與新城斷層的滑移速率分別為 0.45 m/ka 與 0.7m/ka

地球物理

作者	年份	研究方法	研究成果
楊潔豪與郭泰融	1991	地球物理	新城之大崎村活動中心附近的調查結果，認為新城斷層的傾角在 **40~60 度**之間，並推定斷層於其施測的 SC1 測線之 CDP205 測點和 SC2 測線之 CDP111 測點附近通過。
Wang et al.(王乾盈)	1992	地球物理	由淺層反射震測調查認為新城斷層在大崎村附近的上盤岩層出現一連串破裂，研判新城斷層傾角在 **60 度**左右。
Yang et al.	1994 1996	地球物理	由震測剖面認為新城斷層在地表上是一個高角度斷層，北北東走向，平行寶山背斜並切穿背斜的西翼，並在寶山背斜的北部分為二支，並轉為層間滑移斷層，一支在錦水頁岩中，另一支在桂竹林層中。
楊耿明等	2002	地球物理	A 剖面位於頭前溪北岸，B 剖面位於頭前溪南岸，兩條測線均橫跨新城斷層，該深部震測剖面原先解釋認為：新城斷層由深部錯動逆衝而上，將卓蘭層抬升覆蓋於頭嵙山層之上，因此卓蘭層應在斷層上盤出露。
胡玉燕	2005	地球物理	引用深部震測資料建立新城斷層之背景構造，再以淺層反射震測法在關鍵位置上取得近地表地層之影像，追查新城斷層之蹤跡。結果發現新城斷層為典型薄皮逆衝理論之「斷層彎曲褶皺」。但此種逆衝作用並無造成大規模的斷層破裂，而是只造成近地表地層之滑脫拱起、撓曲（flexure）、小錯動，或小突起（buckling）。

鑽井資料

作者	年份	研究方法	研究成果
Chung, C.T.(鍾 振東)	1963	現地調查鑽井資料	繪製新城斷層、青草湖向斜與寶山背斜的相互關係。
Chen(陳 瑞祥)	1974	現地調查鑽井資料	由鑽井資料判斷新城斷層為低角度逆衝斷層，在上新世卓蘭層與中新世打鹿頁岩間之層位落差為 450 至 700 公尺，**斷層面傾角由地表至深處依次為 40 度、20 度及 60 度。**

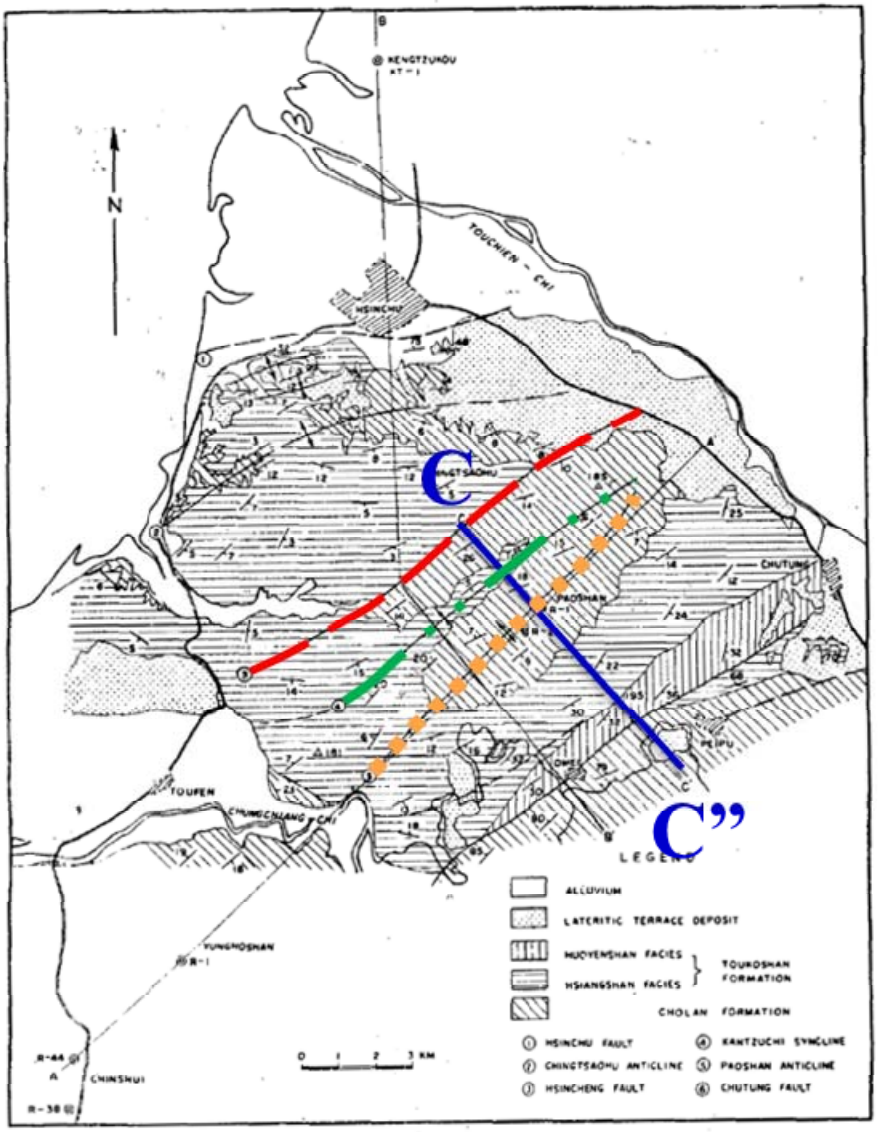


Figure 2. Geologic map of the Paoshan and Chingtsaohu anticlines, Hsinchu.

圖 3-1-63 由北而南－新城斷層(紅)、青草湖向斜(綠)與寶山背斜(黃)的相互關係。(Chung, C.T., 1963)

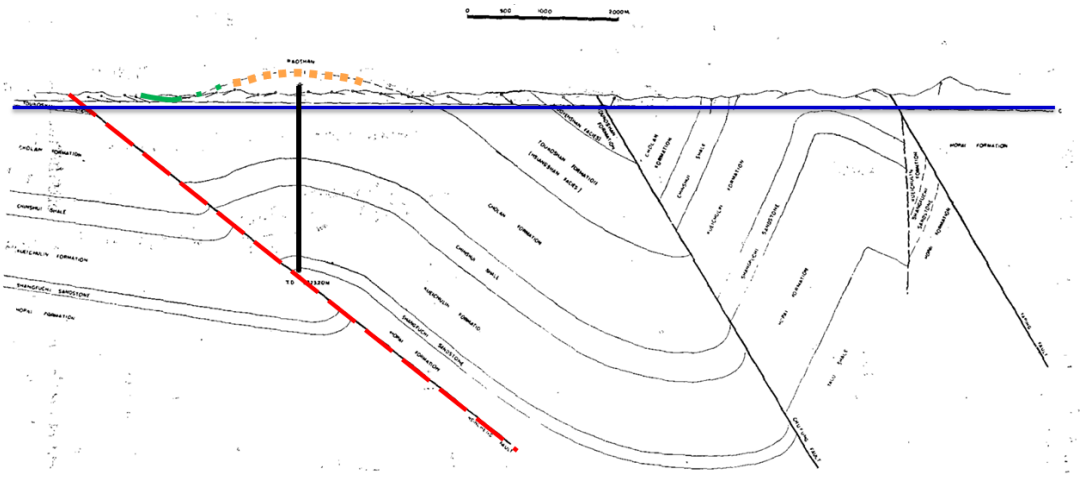


圖 3-1-64 新城斷層(紅)、青草湖向斜(綠)與寶山背斜(黃)的剖面關係 (Chung, C.T., 1963)

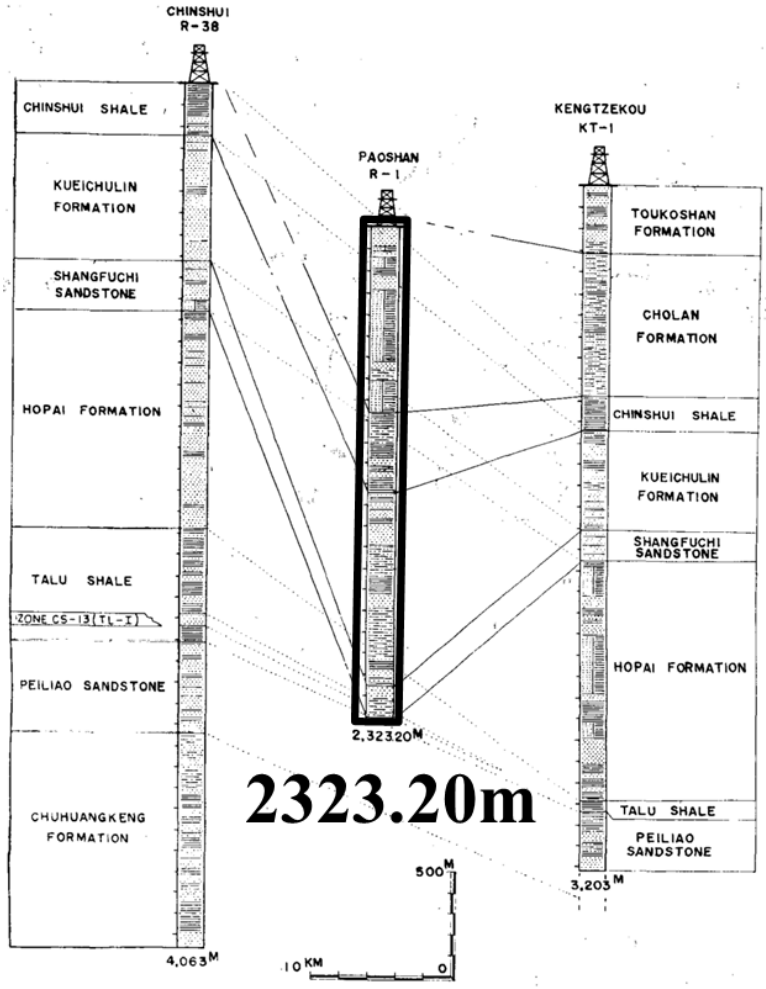


圖 3-1-65 寶山背斜的深井 (Chung, C.T., 1963)

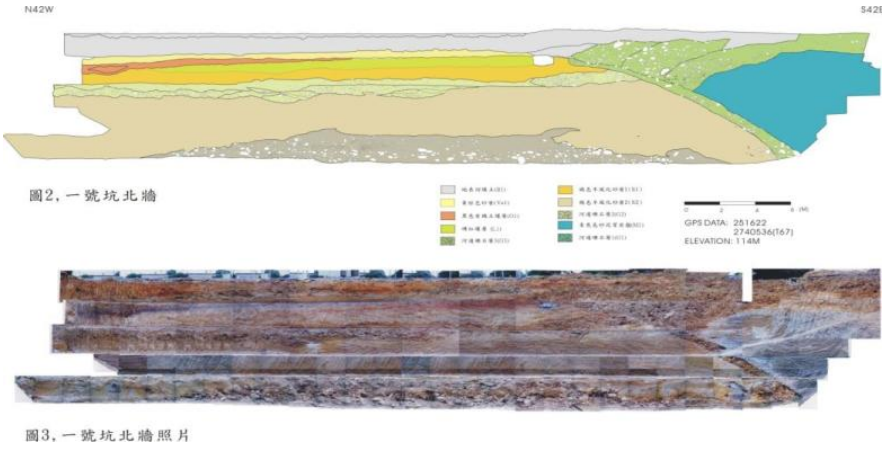


圖2，一號坑北牆

圖3，一號坑北牆照片

(a)北牆

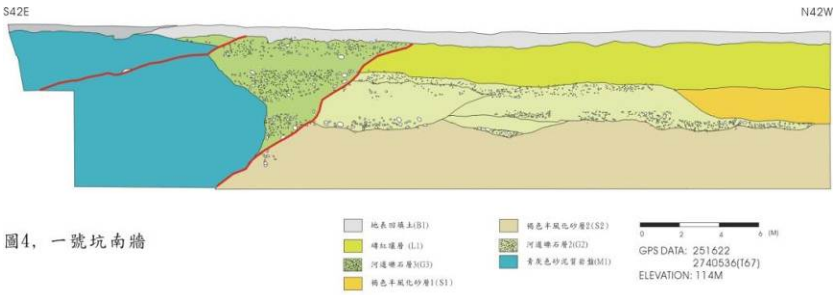


圖4，一號坑南牆

圖5，一號坑南牆照片

(b)南牆

圖 3-1-66 新城斷層槽溝北、南牆剖面

(二) 土壤特性及地質鑽探：

目前主要資料來源為地調所於 2003 至 2004 年間進行之地質鑽井調查報告，主要分布地點可分為三處，沿著新城斷層由東北向西南方向延伸，分別是頭前溪一帶(麻園肚鑽井 BH1~BH4)，竹科園區一帶(新城鑽井三、四、五號)以及下坪一帶(新城鑽井一、二號)。地質鑽井相對於新城斷層之位置如圖 3-1-67 所示。

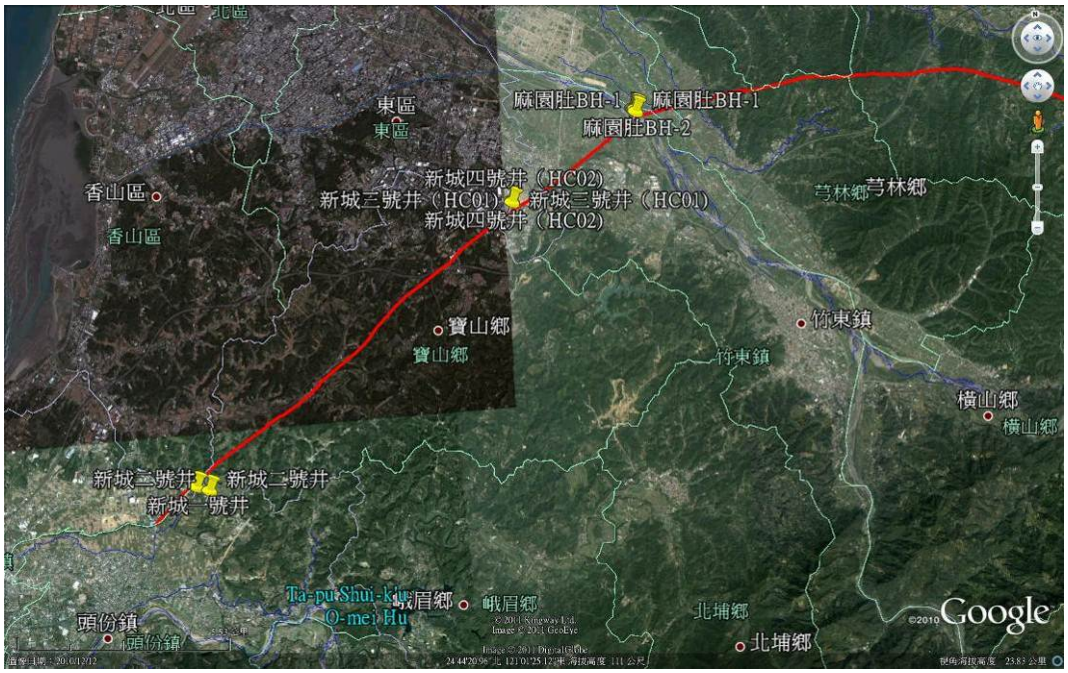


圖 3-1-67 新城斷層沿線鑽井位置圖

首先位於頭前溪一帶，麻園肚鑽井共有四處，如下圖 3-1-68 所示。由此處之鑽井報告整理得知，上盤之麻園肚鑽井 BH1~BH3 土層約可簡化如下：

- ✓ 地表至 4.75~5.75 公尺深為人工回填土偶夾礫石
- ✓ 地表下 4.75~5.75 公尺至 20~30 公尺深處為含黏土之細砂
- ✓ 地表下 30 公尺以下為細砂

利用下盤之麻園肚鑽井 BH4 資訊，土層約可簡化為地表至地表下 12 公尺處為人工回填土及沖積層礫石，地表下 12 公尺處以下為黑色至黃褐色細砂。而新城斷層於科學園區一帶，地調所進行之新城斷層鑽井三、四、五號位置圖如圖 3-1-69 所示，此處鑽井深度約為 30~40 公尺，鑽井報告指出此三個鑽井附近之土壤性質大部分以細砂、極細砂以及粉黏土為主。

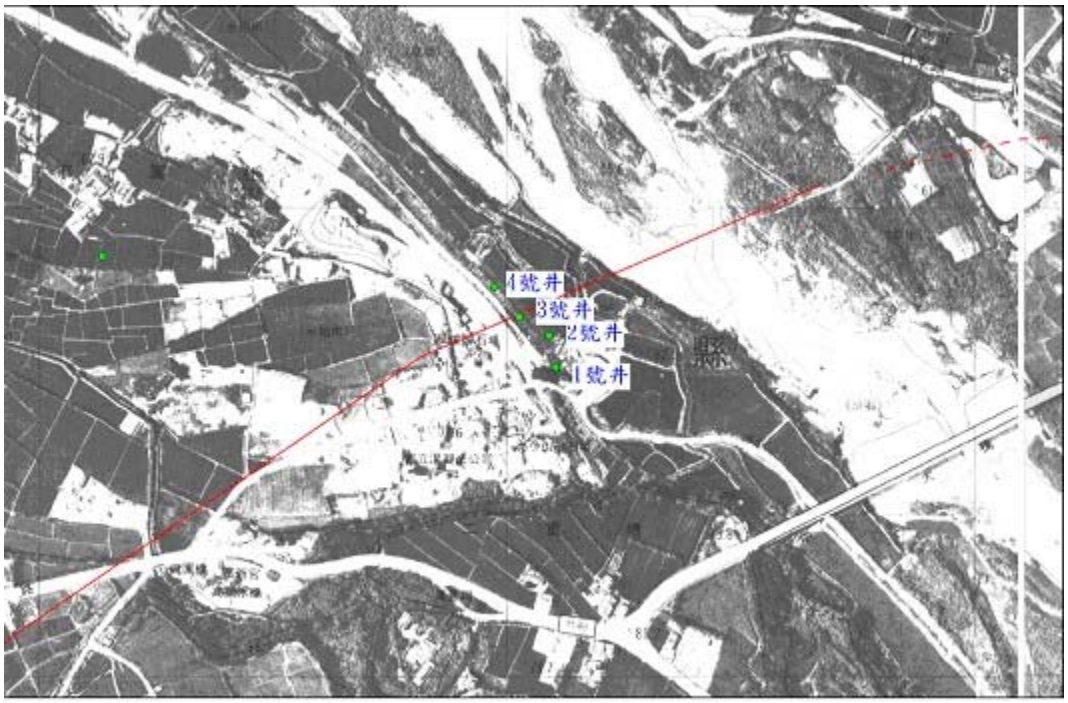


圖 3-1-68 麻園肚鑽井位置圖

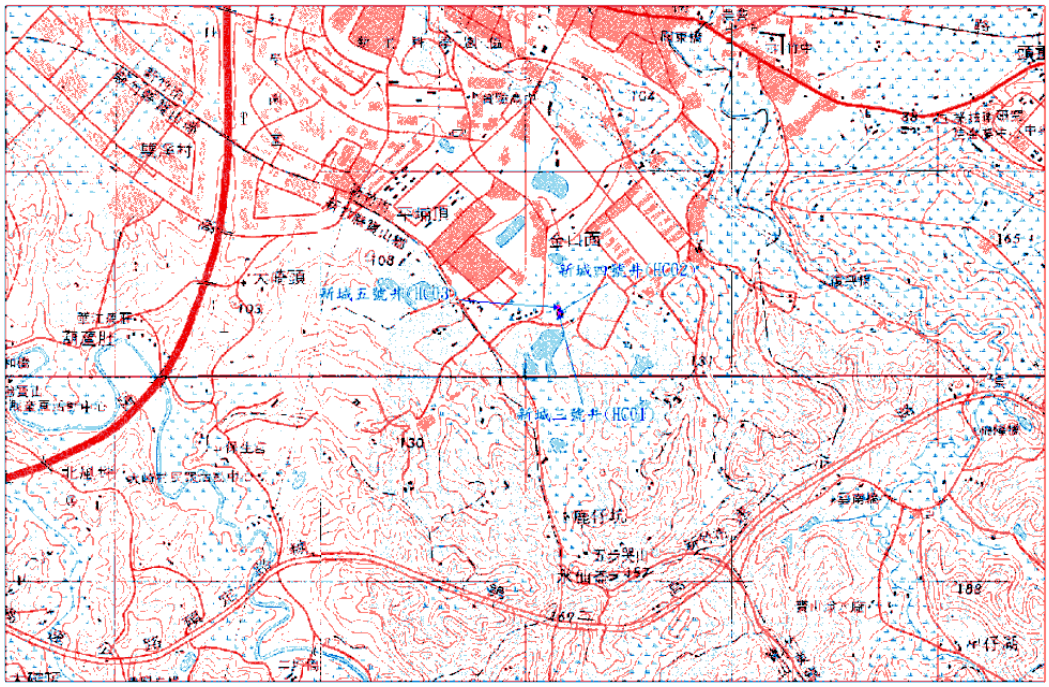


圖 3-1-69 新城三、四、五號鑽井相對位置圖

而新城斷層線位於下坪一帶，附近之新城一號及二號井之位置圖如圖 3-1-70 所示，新城一號及二號鑽井之鑽探深度分別為 50 及 200 公尺，其中由新城一號井整理而得之土層資訊指出，地表至 13.5 公尺處為礫石及砂，13.5 公尺處以下為粉土、黏土層夾砂之地層。新城二號井之土層資訊則指出，地表至地表下 5 公尺處主

要為礫石層，5 公尺以下至 12 公尺處為砂層夾黏土，地表下 72 公尺處之粉黏土層有密集之剪切葉理。

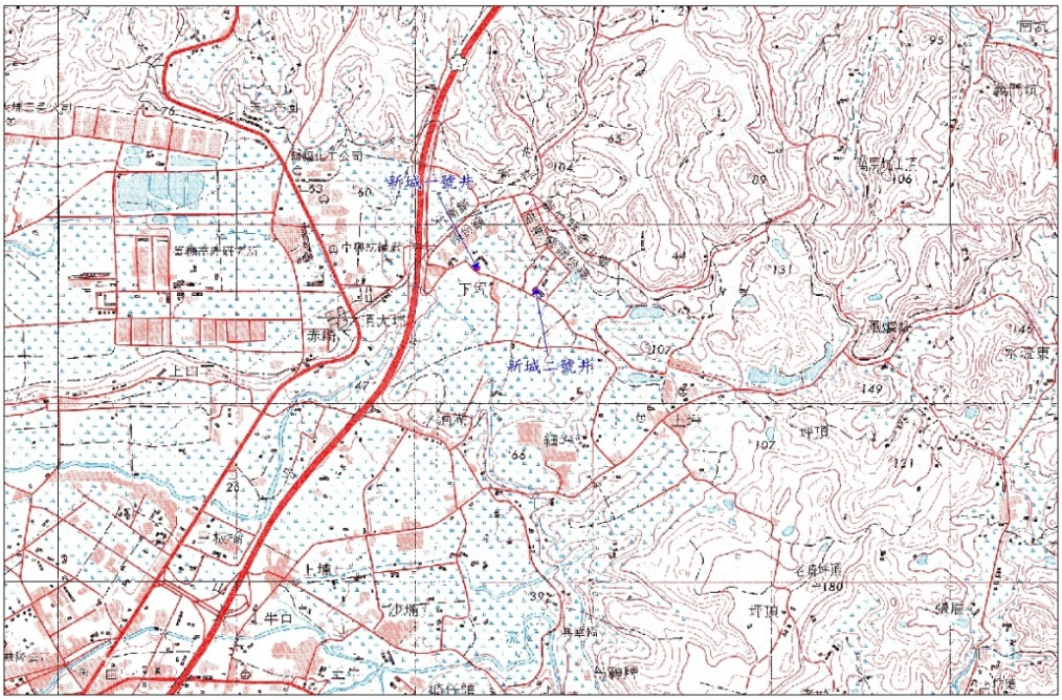


圖 3-1-70 新城一號及二號鑽井相對位置圖

除了上述地調所進行之鑽井資料外，相關資訊尚有國震中心強震測站地質資料，經標示國震中心測站位置與新城斷層線後，較鄰近之測站離斷層線尚有至少 1 公里之距離，因此在判斷土層參數及分布狀況部分，較不適用。圖 3-1-71 所示為較鄰近新城斷層之國震中心測站相對位置圖，包括科學園區高中以及雙溪國小。

由於目前新城斷層相關資料(室內試驗及現地試驗等資訊)較為欠缺，因此尚需選定工程鑽孔鄰近新城斷層線，並進行相關土壤力學及岩石力學試驗，以利土層簡化以及土壤或岩石數值參數之推估。

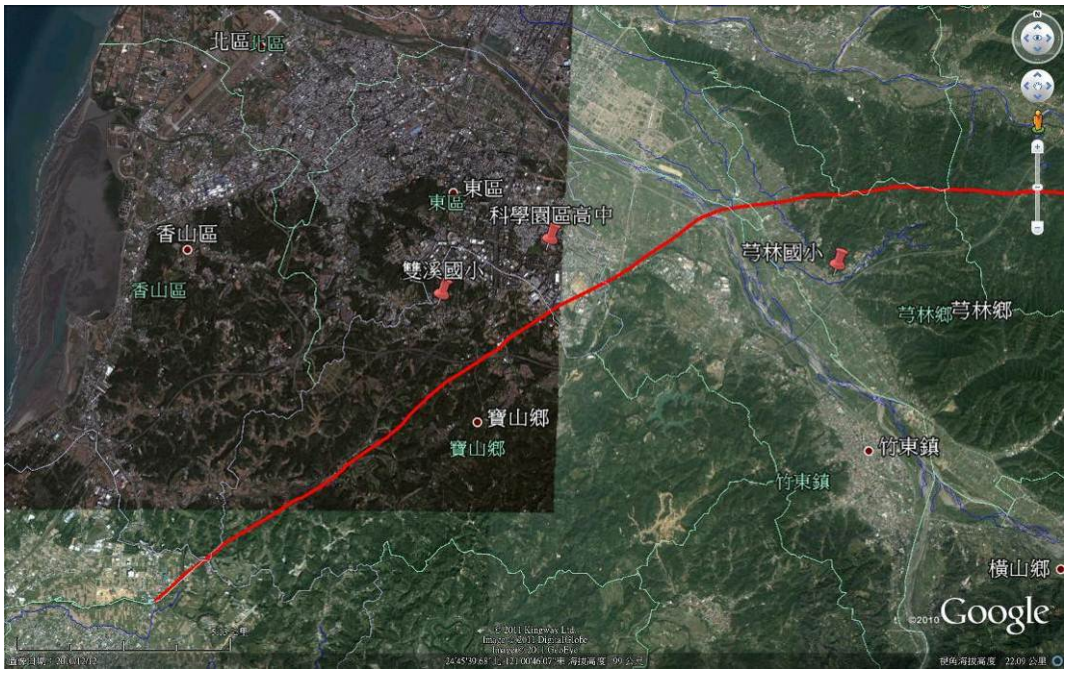


圖 3-1-71 國家地震中心測站與新城斷層相對位置圖 (僅列出較靠近斷層之測站)

(三) 地表變形觀測：

透過本次計畫進行現場調查，多數景物已明顯改變，如圖 3-1-72~76 所示，調查結果初步整理如下：套疊地調所新城斷層條帶地質圖與黃鑑水等(1984)新城斷層斷層跡資料，可看出有露頭點位其斷層跡差異不大，但在無露頭點區域斷層跡相距

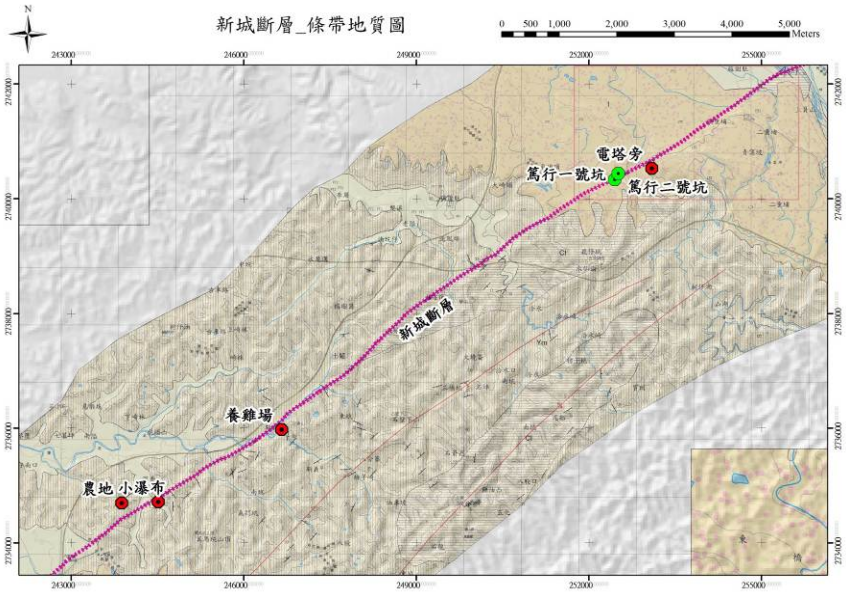


圖 3-1-72 野外觀察點及新城斷層條帶地質圖(地調所，2007)

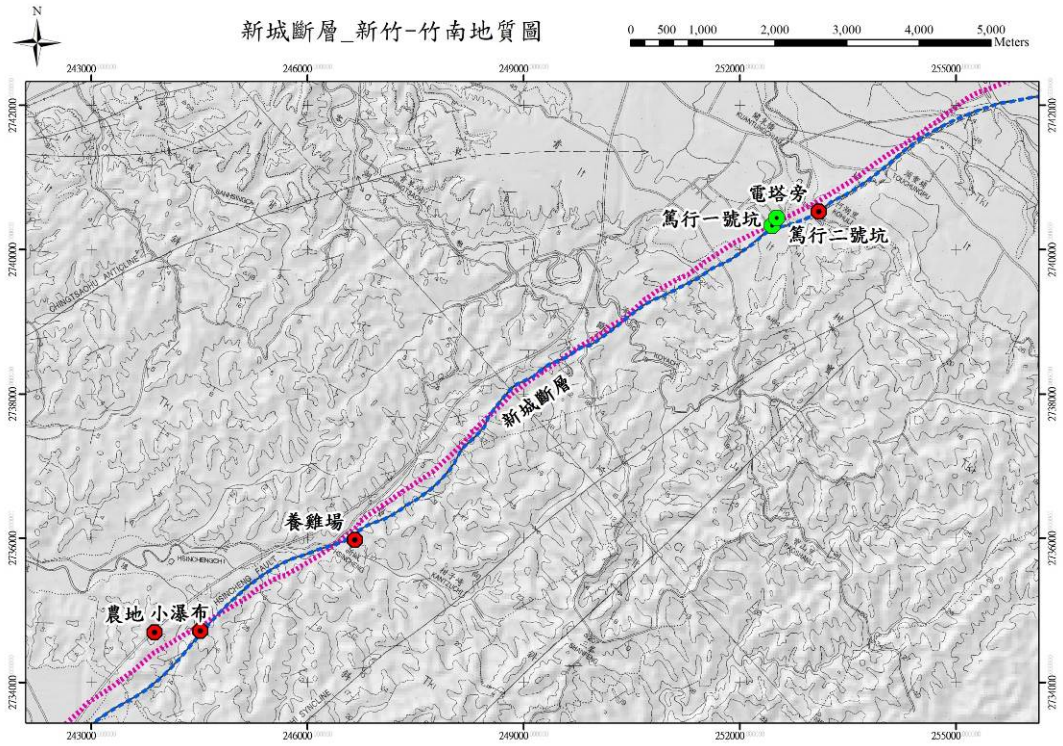


圖 3-1-73 野外觀察點及新竹-竹南海岸地區地質圖(黃鑑水等，1984)

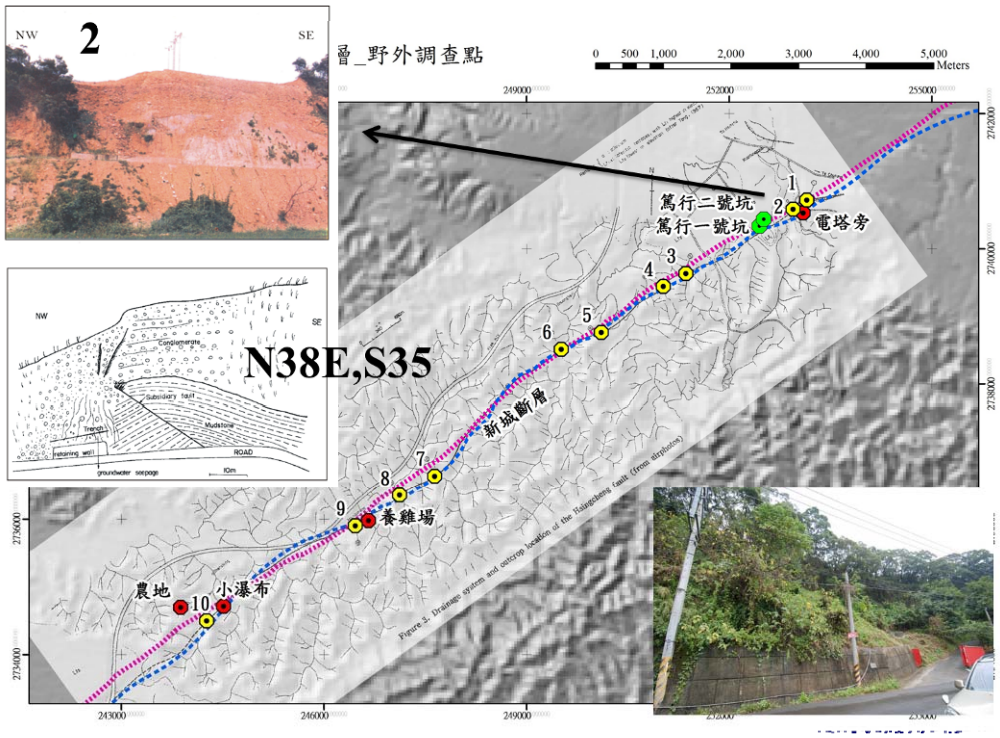


圖 3-1-74 野外觀察點文獻及現況 I

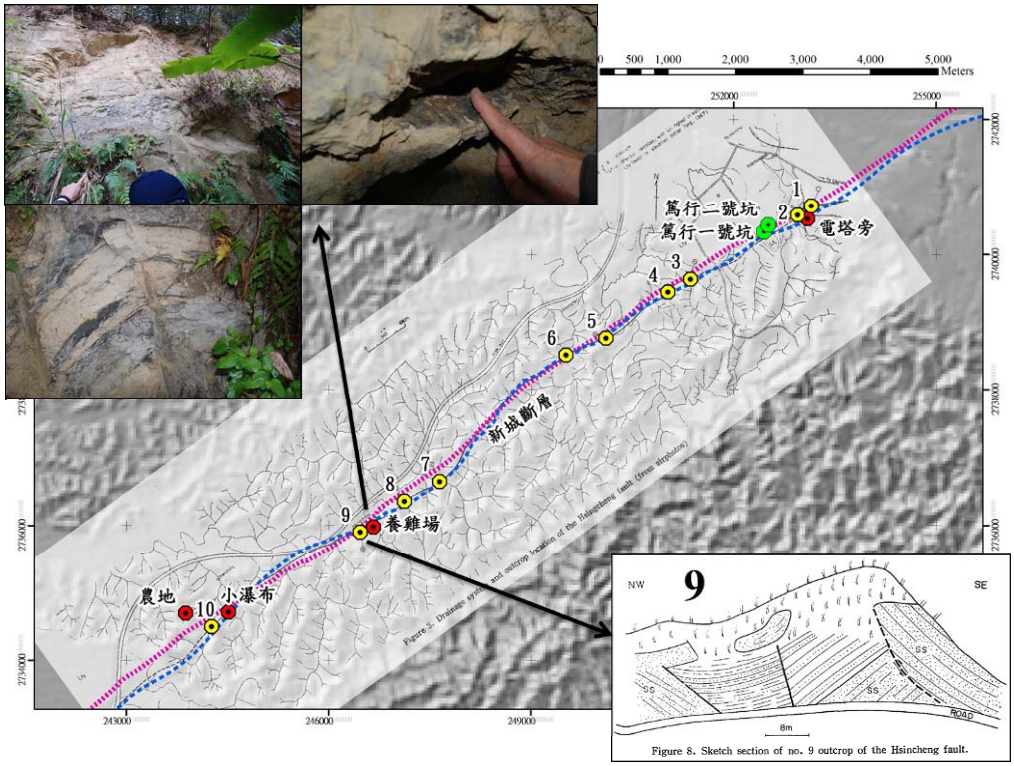


Figure 8. Sketch section of no. 9 outcrop of the Hsincheng fault.

圖 3-1-75 野外觀察點文獻及現況 II

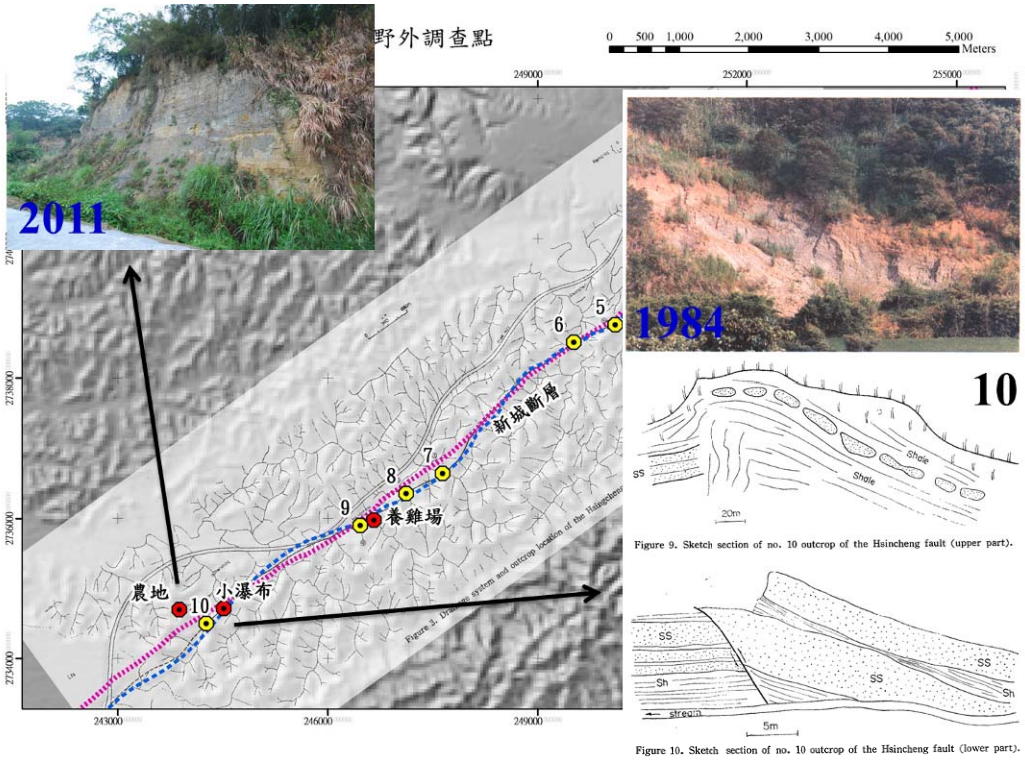


Figure 9. Sketch section of no. 10 outcrop of the Hsincheng fault (upper part).

Figure 10. Sketch section of no. 10 outcrop of the Hsincheng fault (lower part).

圖 3-1-76 野外觀察點文獻及現況 III

(四) 篤行工程井鑽探土層特性整理結果

由經濟部中央地質調查所委託相關廠商進行之工程地質鑽探工作，主要進行鑽探、實驗項目之工作以及鑽探實驗結果報告。為使本計畫進行更加順利，鑽探位置由本計畫協助選定，並針對特定土壤或岩石樣本，建議相關之實驗項目以利計畫之進行。此次工程地質鑽探在新城斷層下盤的部分選定一孔，其鑽孔位置如圖 3-1-77。

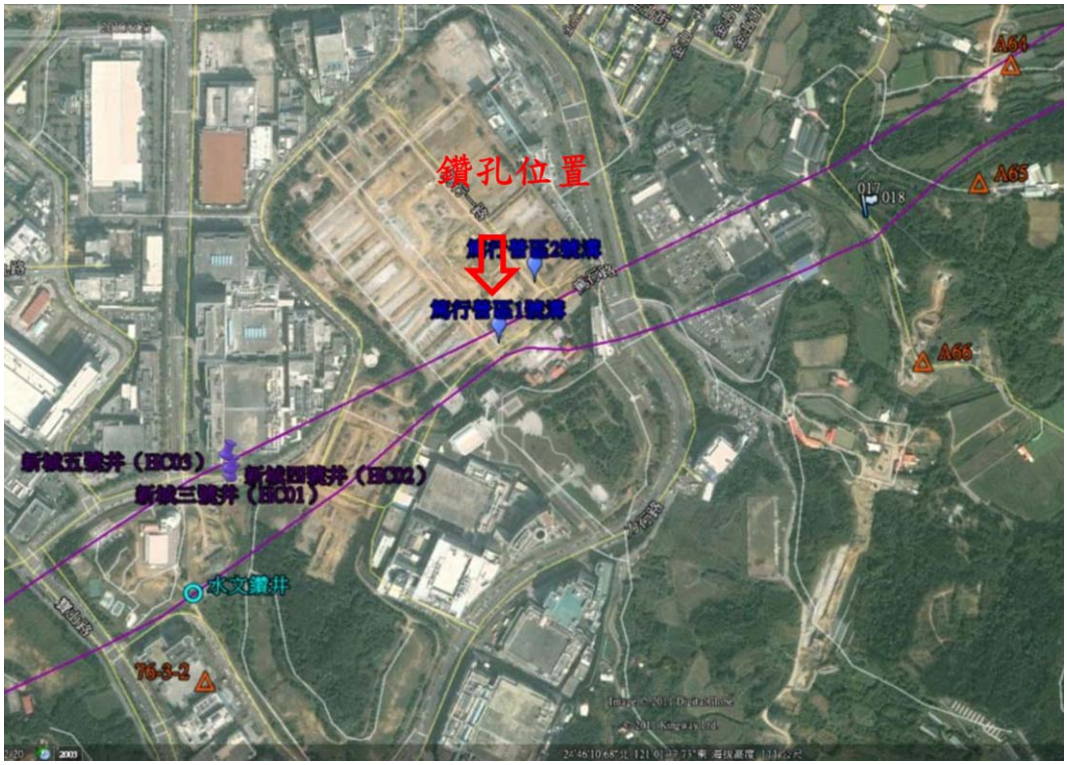


圖 3-1-77 篤行工程井位置圖

照片 3-1-4 為現場鑽探情況，照片 3-1-5 為岩心照片，由岩心照片可以看出由地表至 2.80 公尺為回填土，2.80 公尺至 8.55 公尺為風化粉砂層，8.55 公尺至 17.60 公尺為風化粗礫層，其中 17.45-17.50 公尺夾微斷層，17.60 公尺至 28.75 公尺為粉砂層偶夾非常細砂或細砂層，偶夾厚層砂岩中具沉積構造及碳屑層及生痕化石，28.75-30.25 公尺為細砂層夾有碳屑，小礫石，及生物碎屑。





(a)　　(b)

照片 3-1-4 篤行工程井新城斷層鑽探照片



照片 3-1-5 篤行工程井岩心照片



照片 3-1-5 篤行工程井岩心照片(續)

岩心取樣後進行之各項實驗結果完整報告請見附錄，由這次的實驗結果可以得到如表 3-1-3 之數據，做為明年度開始進行之新城斷層數值模擬的參數依據。

表 3-1-5 篤行工程井岩心室內實驗結果(地調所，2011b)

深度	土壤、岩石分類	單位重 γ_d (kN/m^3)	摩擦角 (度)	凝聚力 (kPa)
3.20~3.95	土壤	20.80	33	7.02
6.10~6.70	土壤	20.21	16.2	77.39
23.8~24.9	岩石	21.65	26.3	249.22
29.0~29.8	岩石	22.56	29.8	367.66

1-3 沉積學與土壤力學對土壤地層描述與分類之比較

(一) 沉積學對土壤地層描述與分類

表 3-1-6 槽溝位置座標

地 點	槽 溝	二度分帶座標	斷 層
台中縣豐原市	中正公園槽溝	223232, 2683290	車籠埔斷層
新竹科學園區	篤行營區 1 號槽溝	251622, 2740536	新城斷層
新竹科學園區	篤行營區 2 號槽溝	251683, 2740639	新城斷層

豐原中正公園槽溝地層描述（圖 3-1-78）：

（1）回填土層（O1）：本層為土黃色的回填土層，沉積物主要為角礫狀的砂岩破塊以及少許的變質砂岩礫石組成，無任何成沉積構造，在上盤部分有建築物基座坐落之上，另外在近地表靠近道路的東側有一薄層的青灰色回填土層。

（2）耕作土層（O2）：本層為深青灰色耕作土層，此耕作土層中夾有竹子的根部，厚度約 0.3m，屬於砂質的土層，底部的界面平整。耕作土層的下部有一層連續性良好的砂層。

（3）砂層（S1）：本層為紅棕色砂層，層後變化從數公分到 20cm 不等，在上盤靠近東徼的地方有呈透鏡狀的礫石層。

（4）砂礫層（F1）：本層為灰色砂礫層，層厚約 1-1.5m，變質砂岩礫石粒徑約從 3-10cm，礫石之間呈現顆粒支持的型態，磨圓度良好，淘選度普通；基質主要為淺灰色的中砂，本層之中局部夾有交錯層理的砂層。

（5）有積土層（O2）：本層為深棕色的砂質土壤層，層厚約 0.2m，本層延續性很差，推估是受到上層砂礫層侵蝕所導致。

（7）礫石層（F2）：本層為淘選度差的淺紅棕色礫石層，層厚約 1.5-2m，礫石主要為變質砂岩礫石，磨圓度良好，礫徑約 3-50cm，礫石之間呈現顆粒支持的結構。

（8）砂礫層（F3）：本層為土黃色砂礫層，礫石之間呈基質支持的結構，淘選度極差，礫石成分主要為變質砂岩礫石並夾有少數的角礫狀的砂岩礫石，基質部分已受到強烈的風化作用變成土黃色砂質土壤。

篤行營區 1 號槽溝地層描述（圖 3-1-79）：

（1）地表回填土（B1）：最厚達 1.4m，包含人為擾動的紅壤層、混凝土塊等人工建物，底部存留有一因過去整地造成之不連續面。回填土中埋有 1983 年 12 月 25 日製作的鋁箔包，因此回填土應於其之後的填方，可能於 1984 年回填的土方。

（2）黑色有機土壤層（O1）：層厚 30-40cm，黑褐色有機質土壤，原為溼地或湖相沉積物，有機質的來源為植物所產生的腐植質，基質為粉砂至泥質。黑色土壤層之下為黃色砂層，厚度約 20-30cm，底部亦為灰黑色泥層。砂層與泥層呈現液化現象，砂層具有火焰狀與荷重構造。

（3）磚紅壤層 1（L1）：基質為細砂至粉砂質，最大厚度 2m，由上而下顏色呈現漸變。此層為紅土台地的最表層土壤層。

（4）褐色風化砂層（S1）：層厚大致均維持在 1.5m 左右，細砂至粉砂質，含有風化作用產生的淡灰色細斑。

（5）礫石層（G1）：粒徑 20cm 以下的變質砂岩礫石所組成，細砂質基質支持，部分呈透鏡狀構造。

（6）褐色風化砂層（S2）：厚 3.5m，粉砂質，含有風化作用產生的細斑紋。

（7）礫石層（G2）：組成 50%以上為粒徑大於 20cm 之巨礫，為顆粒支持結構，礫石呈圓礫，由變質砂岩所組成，中間夾數層透鏡狀砂體，厚度可達 1m，由槽溝中之出露面推測此一古河道寬度在 20m 以上。層層位位於下盤的最下層。

（8）礫石層（G3）：依礫石排列可見明顯的層理，此礫石層受到斷層帶影響有部分被拖曳至斷層帶之中，礫石最大粒徑達 40cm。斷層帶的礫石順斷層滑移方向略與斷

層面平行排列，本層礫石大都由變質砂岩所組成，其層位位於上盤，不整合在卓蘭層之上。

（9）青灰色砂泥質岩層：位於斷層上盤，基質為粉砂至泥質，依岩性判斷為卓蘭層，在本槽溝中出露面厚度 10m 以上，頂部為厚度 2-3m 薄層之砂頁互層。

篤行營區 2 號槽溝地層描述（圖 3-1-80）：

（1）地表回填土(B1)：層厚 1-2m 不等，含有混凝土塊及塑膠、紅磚等雜質，礫石受挖掘所擾動破損且排列十分紊亂，表面為柏油路面與地基，下部夾雜水管與鋼條，地表成一緩坡，傾斜約 8°。

（2）磚紅壤層(L1)：平均約厚 1.5m，深赭色紅土，基質為細砂到粉砂質，風化程度高，黏聚性強，硬化程度相當高，可見長期暴露於地表，顏色向下漸變為黃棕色，下部與 Ys1 黃棕色土層相接。

（3）黃棕色風化土層(Ys1)：與 L1 相接，均為同一時期沉積的產物，但含水量較高，呈現黃至棕色，且風化程度較 L1 小，硬度亦較低，厚約 30cm-50cm。

（4）磚紅壤層(L2)：厚度 15-20cm，與 L1 相同，粒度、質地亦相同，位在 Ys1 之下。

（5）灰化黏土層(C1)：平均約厚度約 15cm，為位於 L1 之下，高粘聚性土層，基質呈粉砂至泥質。

（6）黃褐色砂層(Bs1)：位於 C1 與 C2 灰化土層間，呈現黃褐色至暗褐色。

（7）灰化黏土層(C2)：位於 Bs2 黃褐色砂層之下。

（8）黃褐色砂層(Bs2)：位於 C1 灰化土壤層及 C2 灰化土壤層之間，粒度、膠結度皆同 Bs1 黃褐色砂層。

（9）河道礫石層(G1)：大部分粒徑在 10-30cm 之間，顆粒呈次圓狀，底部層面傾斜 20°，頂部層面傾斜 15°，成一楔形，為斷層活動後形成的的超覆沉積序列，受過強烈風化。覆蓋於 S1 厚砂層之上，於底部有一侵蝕面，為高能量水流夾帶較大型礫石侵蝕作用的結果。礫石粒徑均小於 5cm，圓度高，顆粒支持，呈順向排列。此層位於斷層的上盤。

（11）厚砂層(S1)：位於斷層的上盤，黃色砂岩具平行紋理構造，傾斜 27°，顆粒為細砂。

（12）青灰色砂泥岩(M1)：位於斷層上盤，基質為粉砂至泥質，質地緻密，有受剪切變形，屬於卓蘭層。

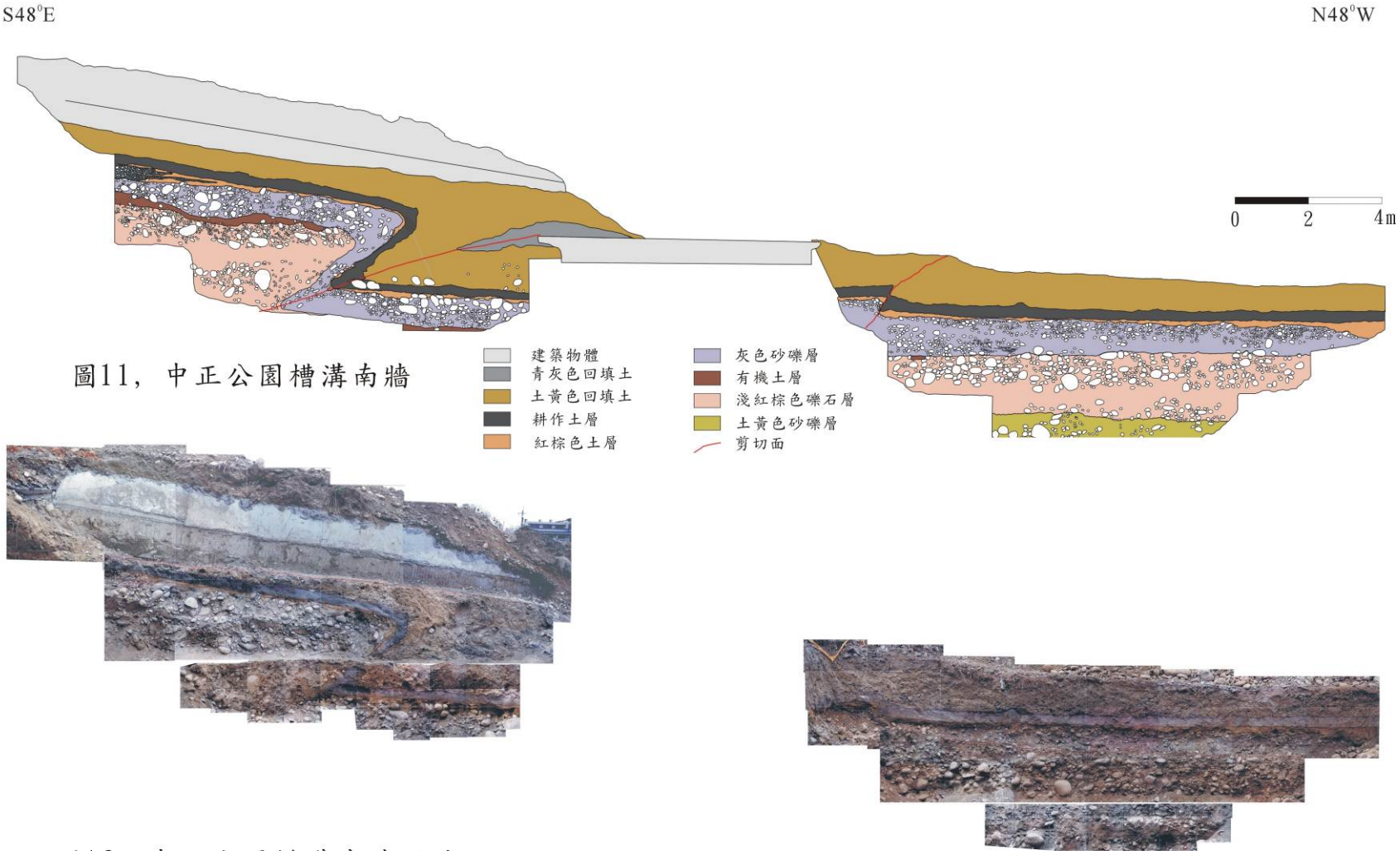


圖 3-1-78 中正公園槽溝南北剖面圖

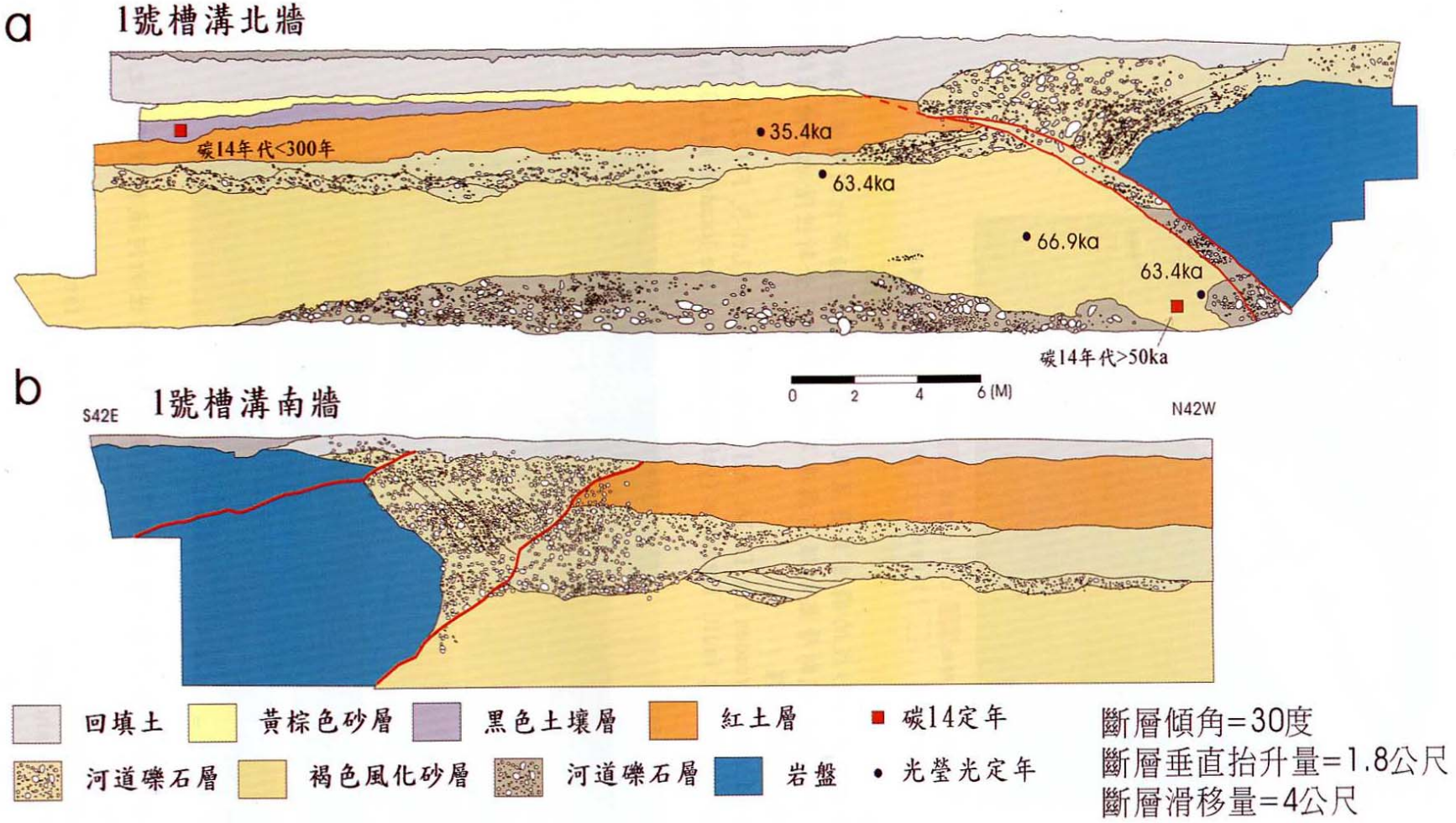


圖 3-1-79 新竹篤行 1 號槽溝南北剖面圖

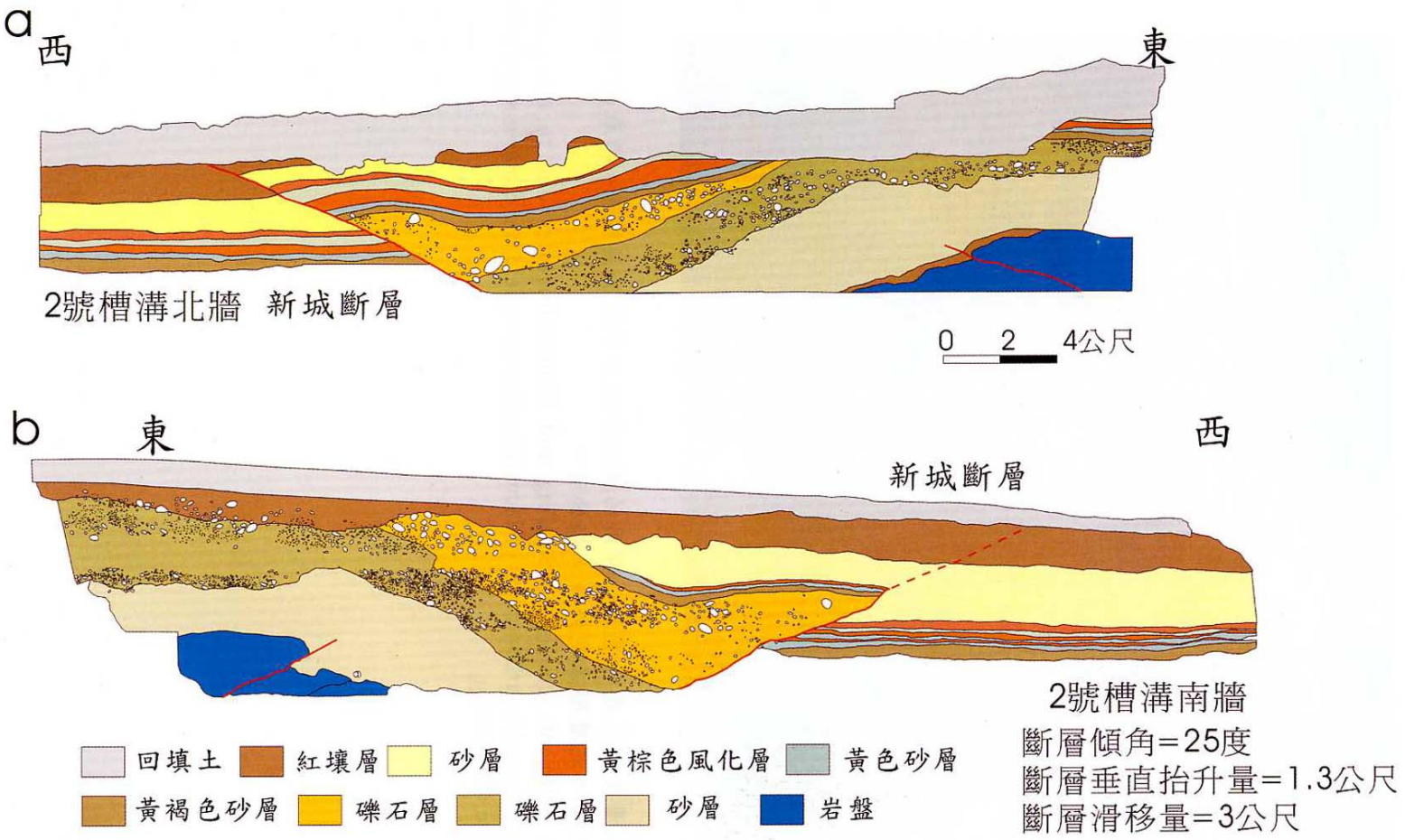


圖 3-1-80 新竹篤行 2 號槽溝南北剖面圖

(二) 土壤力學對土壤地層描述與分類

由中正公園北、南井及篤行工程井取得之岩心進行土壤力學之分類，可以得到土壤力學中土壤地層之描述與分類下表 3-1-7 及表 3-1-8。

表 3-1-7 中正公園北、南井取樣之土壤力學地層描述

鑽井	深度 m	G_s	e	W %	γ kN/m^3	LL P	PI %	Grand Size %				Unified Classification
								Grav.	Sand	Silt	Clay	
中正公園北井	3.20~3.55	2.71	0.52	12	19.62	-	NP	47	44	8	1	GP-GM
中正公園北井	4.05~4.50	*	*	9	17.46	-	NP	84	13	3	0	GP
中正公園南井	2.55~3.00	2.70	0.69	20	18.84	27	9	26	48	22	4	SC
中正公園南井	4.05~4.50	2.69	0.51	16	20.31	30	13	33	41	22	4	SC
中正公園南井	5.90~6.35	2.69	0.46	17	21.19	29	11	22	47	26	5	SC
中正公園南井	7.05~7.50	2.67	0.48	17	20.70	24	7	0	62	30	8	SC-SM
中正公園南井	8.55~9.00	2.66	0.45	16	20.80	25	9	14	50	29	7	SC
中正公園南井	10.05~10.50	2.72	0.46	18	21.58	26	10	18	43	33	6	SC
中正公園南井	13.05~13.33	*	*	12	20.31	27	10	52	32	16	0	SC
中正公園南井	16.05~16.23	2.74	0.41	12	21.39	-	NP	40	42	15	3	SM
中正公園南井	18.40~18.55	2.69	0.47	18	21.09	-	NP	0	63	26	11	SM
中正公園南井	19.05~19.27	*	*	10	20.50	20	4	75	16	9	0	GP-GM
中正公園南井	20.55~21.00	2.7	0.59	16	19.33	20	4	4	37	31	26	GC-GM
中正公園南井	21.00~21.20	2.67	0.41	16	21.58	-	NP	0	53	31	16	SM
中正公園南井	21.20~21.40	2.65	0.50	18	20.50	-	NP	0	56	32	12	SM
中正公園南井	21.44~21.60	2.66	0.47	17	20.70	-	NP	0	66	22	12	SM

表 3-1-8 篤行工程井取樣之土壤力學地層描述

鑽井	深度 m	G_s	e	W %	γ kN/m^3	LL P	PI %	Grand Size %				Unified Classification
								Grav.	Sand	Silt	Clay	
篤行工程井	3.95~4.40	2.73	0.52	14	20.01	-	NP	36	45	15	4	SM
篤行工程井	5.55~6.00	2.73	0.70	24	19.52	36	16	0	26	43	31	CL
篤行工程井	7.05~7.50	2.74	0.64	22	20.01	36	17	0	27	45	28	CL
篤行工程井	8.55~9.00	2.75	0.56	19	20.60	-	NP	12	64	17	7	SM
篤行工程井	10.00~10.27	2.74	0.42	11	20.99	-	NP	19	59	18	4	SM

篤行工程井	11.50~11.82	2.73	0.45	14	21.04	-	NP	49	35	14	2	GM
篤行工程井	13.00~13.35	2.73	0.49	15	20.70	-	NP	40	47	11	2	SM
篤行工程井	14.55~14.59	2.71	0.31	10	22.27	-	NP	38	44	14	4	SM
篤行工程井	17.50~17.95	2.73	0.53	16	20.31	-	NP	0	21	58	21	ML
篤行工程井	19.00~19.30	2.72	0.43	16	21.68	24	6	0	4	63	33	CL-ML
篤行工程井	3.20~3.95	2.64	0.47	18	20.80	-	NP	0	58	27	15	SM
篤行工程井	6.10~6.70	2.69	0.61	23	20.21	37	18	0	27	53	20	CL

2. 室內試驗-離心試驗

2-1. 物理模型試驗

進行物理模型試驗 (1g 或離心模型) 的目的，是在控制的試驗條件下(包括土壤性質、邊界條件及受力條件)，藉由完整詳細的量測數據，來探究原型的破壞機制及過程，並進而發展或驗證數值模擬或分析方法的可靠性。因此物理模型試驗的成果，可以幫助分析者更了解研究問題的重要力學或破壞機制(Failure Mechanism)，進而提出新的或改進的分析方法或概念。當然也可以利用試驗成果與數值分析的結果進行比較，來驗證目前數值分析程式對該研究問題的可用性。本計畫將利用離心模型試驗，模擬正斷層錯動時(斷層傾角 60 度)，上覆土層的錯動變位情形以及影響範圍，並探討影響上覆土層錯動變位的影響因子。試驗成果也可提供本計畫數值分析校對之用。

2-2. 1 g 模型試驗

利用 1 g 模型試驗成果推估及探討原型斷層錯動，造成地表覆土層變位及影響範圍，這種試驗相對直觀且簡單；缺點是模型覆土應力非常低，與現場應力有差距，但是不論國內外都仍然有相當良好的研究成果。國內 lin et al. (2006)利用如圖 3-2-1 所示逆斷層砂箱試驗進行 1g 模型試驗。圖中定義模型試體厚度為 H，而頂升垂直距離為ΔH，ΔH/H 可描述斷層發展的程度；W 則代表斷層在地表發展的範圍。圖 3-2-2 為不同逆斷層傾角與斷層錯動範圍

的數值模擬(ABAQUS)及模型試驗結果，圖 3-2-3 顯示除了逆斷層傾角會影響 W/H 的大小外，傾角愈小 W/H 愈大；另外由數值模擬顯示砂土膨脹角愈大，W/H 也愈大。圖 3-2-4 則顯示逆斷層抬升距離與斷層破裂跡發展長度的關係。Lin *et al.* (2006)的研究結果顯示下列因素影響上覆土層的變形，包括：(1)基盤頂升速率；(2)斷層傾角(Dip Angle)；(3)土層的膨脹角(Dilation angle)；(4)土壤楊氏模數；(5) 土壤柏松比；(6)土壤的凝聚力及摩擦角；(7)模型縮尺比(Scaling)；(8)地表載重。其中以土壤的膨脹角及土壤的楊氏模數為預測斷層區發展範圍最重要的影響因素。

2-3. 離心模型

由 1g 模型試驗的研究成果顯示：在相同的斷層型態及斷層傾角下，覆土土層的厚度、砂土的膨脹角及顆粒尺寸都會影響上覆土層的破裂跡及出露地表的型態，因此物理模型試驗的成果，當推論到現場條件下，必須小心。覆土層厚度的大小直接對應著垂直覆土應力的大小；而受剪過程膨脹角大小的表現與所處有效應力大小亦有直接的關聯，因此進行斷層錯動物理模型試驗時，必須盡量能使用模擬現場應力大小的離心模型來進行模型試驗。

2-4. 離心模型試驗箱的設計

大地工程問題絕大部分是解無限邊界的邊界值問題(Boundary Value Problem)，因此無論是數值方法或物理模型進行現場或原型的模擬，都涉及邊界位置(Boundary)的選擇；而選擇合適的邊界種類及位置，才可以得到正確的問題解。因此進行大地工程相關的物理模型試驗（1g 或離心模型試驗），針對不同的模擬對象，進行模型試驗箱(container)的設計是試驗成功最重要的一環。目前中央大學土木系的地工離心機(NCU Centrifuge)，容量 100 g-ton，標稱旋轉半徑(Nominal Radius) 3 公尺，屬於中尺度的地工離心機(圖 3-2-5)，於民國 86 年正式啟用，並進行與靜態有關的離心模型試驗。於民國

98 年新裝置 1-D 振動台(圖 3-2-6)，可以進行離心模型動態的試驗，例如砂土液化、樁土受震反應相關大地地震工程的研究。目前離心模型試驗室已經有三個固壁式試驗箱(Rigid Box)及一個積層板試驗箱(Laminar Box)，其中兩個固壁式試驗箱有壓克力觀景視窗，在試驗過程中可以利用照相，來連續掌握地盤的變位。目前現有的四個試驗箱(圖 3-2-7)，能夠進行大地工程中靜力及動力相關問題的教學與研究工作，但是能模擬斷層錯動的試驗箱，則需要本研究進行設計及製作。

本節主要說明適用本研究的斷層錯動模擬試驗箱的設計及製造過程。針對前面影響斷層跡的因素，本研究的斷層錯動模擬試驗箱及施力設備的設計目標，可以在 80g 的離心飛行中，進行 60 度斷層傾角及不同錯動量的正斷層或逆斷層的離心模擬，斷層的錯動位移以伺服馬達驅動，進行位移控制(Displacement Control)的試驗。可進行離心模型試驗的試驗變數，包括：(1)覆土層厚度；(2)不同種類的上覆土層(不同相對密度的砂土或不同剪力強度的黏土層)；(3)不同 g 值下，進行相同覆土層厚度的試驗；(4)不同基盤的粗糙度及基盤的型態；(5)能夠在不同 g 值情況下，透過觀景視窗觀察斷層錯動時，斷層跡的發展情形。

本研究設計的斷層錯動模擬試驗箱(Fault Simulation Container)尺寸受限於離心機掛台空間 (長×寬×高)及掛台載重(400 kg)的限制，圖 3-2-8(a)~(c)為 NCU 離心機掛台空間，長寬高的限制。圖 3-2-9 為本研究斷層模擬試驗箱在限制條件下，最大可用空間為(長×寬×高=100 公分×550 公分×72 公分)。因此斷層試驗箱的最大外部尺寸，設定為長×寬×高=100 公分×528 公分×67.5 公分。圖 3-2-10 為斷層試驗箱及外部馬達及渦輪減速機的設計圖。試驗箱分成上下兩層，下層為驅動斷層上下錯移機械機構所佔用空間，圖 3-2-11 為斷層頂升或下降機構，該機械機構利用正反螺紋模具合金鋼螺桿，連接渦輪減速

機，可以驅動斷層沿 60 度方向上下錯移。另外試驗箱的側壁外緣，吊掛 AC 伺服馬達及渦輪減速機，是斷層錯動的動力來源。上層部分包括限制斷層錯動角度(60 度)的滑動機構及試體試驗區，試體尺寸為長×寬×高= 74 公分×30 公分×32.5 公分。為了減輕試驗箱重，除了馬達及螺桿外，全部採用鋁合金製作，預計試驗箱重及試體重兩者總重小於掛台最大載重 400kg。220V 的 AC 伺服馬達，出力 200W，配合 1/200 齒減速機和 1/30 渦輪減速機，可調整斷層錯動速率介於 0-2.5mm/min 間，上下錯動位移可達到 7 公分。試驗箱側壁板開了一個長×高=60 公分×28.15 公分的壓克力視窗，可供試驗過程進行攝影觀測。上述試體尺寸在 80g 的試驗條件下，代表原型尺寸長×寬×厚=59.2 公尺×24 公尺×22 公尺，斷層錯動沿設定 60 度的滑動面，原型最大錯動距離可達 5.6 公尺。

為了確保斷層模擬試驗箱在 80g 的重力場，仍能保持平面應變狀態，而且箱壁不會產生塑性應變，造成永久變位，影響箱壁間的拆卸，所以進行試驗階段最大受力狀況下的應力分析。本計畫利用 ABAQUS 商用軟體進行 3-D 有限元素法應力分析。最後在最大應力及最大變形量的考量下，採用 3 公分作為最終試驗箱的箱壁版厚，底板厚度則採用 3.5 公分的版厚，如圖 3-2-12 所示。

2-5. 試驗用砂

本試驗初期利用乾燥砂進行離心斷層錯動離心模型試驗，試驗砂床將利用石英細砂及染色石英細砂製作而成。本研究所採用的石英細砂，在使用前均放入烘箱內烘乾超過 24 小時，再儲存於橡膠桶當中。砂樣分別進行篩分析、最大、最小乾密度試驗等土壤基本物理性質試驗。篩分析結果可知試驗用之石英細砂之粒徑分佈為不良級配(poorly graded)，通過 200 號篩僅有約 0.2%，細粒料含量極少。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，依統一土壤分類法為 SP。色砂將用藍色油性染料將石英細砂染色而成。

石英細砂最大及最小乾單位重則由日本 JSF T26-81T 之試驗方法求得，其最大乾單位重為 16.27 (kN/m^3)，最小乾單位重為 13.52 (kN/m^3)。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 3-2-1 為試驗砂樣的基本物理性質；圖 3-2-13 為試驗用砂篩分析曲線；圖 3-2-14 為試驗用砂砂顆粒的放大照片。本研究利用乾霣降法(dry pluviation)法準備直剪試驗所需砂試體，並進行直接剪力試驗。圖 3-2-15 及圖 3-2-16 為不同相對密度的砂土直接剪力試驗的結果。

2-6. 模型試體床製作

本研究以霣降法製作砂土模型試體床，以圖 3-2-17 所示 Chen et al. (1998)所設計的移動式霣降儀，配合固定落距進行不同相對密度的試體準備。圖 3-2-18.19 為移動式霣降儀的照片。以移動式霣降儀，製作乾砂模型試體床之方法步驟如下:

1. 降下霣降機之盛土漏斗，並將試驗用砂土，經過 16 號篩過篩後，去除雜質並倒入漏斗內，待裝入足夠之砂土後，再將漏斗拉升至適當高度，並使鋼管固定於二維滑動架上。
2. 將組立好的模型試驗箱放置於可升降之推車上，並置於鋼管下方，微調鋼管出口至試體表面的距離，以此為砂土霣降高度。
3. 開啟鋼管管口進行霣降，霣降路徑採用 U 型迴圈路徑法，如圖 3-2-17 所示，使各層之土壤表面保持平整，並保持每層霣降高度維持一定，確保試體內不同深度處砂土之相對密度一致。
4. 每層霣降砂層之厚度，控制在不超過鋼管直徑，因此在完成一層砂層鋪築後，即封住鋼管管口。利用小漏斗鋪築 1 公分的色砂層，並利用升降推車

重新調整鋼管至預定新的實降高度。

5. 到達預定高程時，循序放入感測器，並小心固定訊號線。重複步驟 3、4、5 直到砂床達到預定試體高度為止。
6. 把多餘的砂土，刮除並回收後，由吊秤量得試驗箱內之砂土重，進而求得模型整體之相對密度。
7. 將試驗箱吊至離心機掛台上，連接信號線，準備進行離心飛行。

2-7. 離心斷層模型試驗相關設備-地工離心機及掛台

本研究所採用之地工離心機試驗設備係由法國的 Acutronic 公司所設計與製造之 665 型；掛台為美國 PVL Technologies 所設計製造之 ES-18 型，試驗設備可分為：

1. 離心機機械主體(centrifuge mechanical assembly)。
2. 電源供應系統(power supply system)。
3. 操作者控制系統(operator desk controller)。

離心機之有效旋轉半徑為 3 公尺，離心機本身之承載容量為 100 g-ton，離心振動台則可承載 400 公斤重之試體與相關設備、繞行至 80g 之離心重力場進行試驗。離心機與之外觀詳見圖 3-2-9 所示。

2-8. 斷層錯動模擬試驗箱的製作及試驗計畫

圖 3-2-21~23 分別為初步製作完成的斷層錯動模擬試驗箱的側視圖；圖 3-2-24 則為斷層頂升塊的頂升及下降傳動機構。斷層錯動模擬試驗箱正積極測試中，預計 11 月底可完成校正工作。測試完成後，將先行進行不同相對密度砂土及覆土層厚度的 1g 模型正斷層錯動試驗，並與 Lin et al. (2006)的試驗成果比對。表 3-2-2 為預定進行之 1-g 正斷層錯動模型試驗種類。此系列的試驗目的是了解上覆土層厚度及相對密度這兩個變因，對斷層範圍及斷層跡出露地表的影響程度。其中上覆土層厚度主要是有效覆土應力的影響，因此本系列試驗的試驗成果，可以與隨後在不同 g 值情況下，進行不同上覆土層

厚度的離心正斷層錯動模型試驗的試驗結果進行比對，可以幫助了解上覆土層厚度影響正斷層跡出露地表及分佈範圍的重要因素。

2-9. 斷層錯動模擬試驗的試驗步驟

斷層錯動模擬試驗的試驗步驟如下:

1. 利用乾霣降法準備不同相對密度的試驗砂床。每霣降 2 公分厚度的砂層後，鋪築一層相同相對密度的染色砂層。最後準備不同上覆土層厚度(10 公分，20 公分及 25 公分)的砂床。染色砂層的鋪設，可以幫助斷層跡發展的辨識。

2. 箱頂裝置雷射位移計，量測地表不同位置的垂直變位以及斷層垂直錯動量。

3. 在壓克力視窗側及箱頂裝設照相機，進行拍照，影像供後續 PIV 分析。圖 3-2-25 為照相拍攝的示意圖。

4. 開動頂升馬達，利用雷射位移計以及照相機，每隔固定時間量測地表不同位置的垂直變位、斷層垂直錯動量以及拍攝影像。

5. 利用 PIV 影像分析分析由壓克力視窗所拍攝的影像，建立地表及不同深度處的垂直變位剖面。

6. 試驗完成後，利用雷射位移計掃描最後地表剖面。

2-10. 斷層錯動 1g 模擬試驗的初步試驗成果

為了瞭解新設計的斷層錯動模擬試驗箱的功能、量測設備間的運作及該試驗箱的限制，首先進行 1g 條件下的逆斷層錯動模擬試驗。為了說明逆斷層錯動(錯動角度=60^{o})的發展過程，1gRtest1(Dr=45%)的試體高度(H)為 20 cm，斷層由左側向右側沿 60^{o} 錯動，該試驗的最大垂直錯動距離(△H=5.10 cm，△H/H=0.255)。圖 3-2-26a 至圖 3-2-26m 為 1gRtest1 試體在不同的垂直錯動距離(△H)，由壓克力視窗所取得的影像圖，利用這些影像可以觀察斷層跡由岩

盤破裂處向地表延伸發展的過程。該試驗的最大垂直錯動距離(△H=5.10 cm，△H/H=0.255)。對於斷層角(dip angle)較陡的斷層發生錯動時，垂直地表的差異變位(vertical differential movement)及水平變形都是造成結構物損壞的主要原因，圖 3-2-27a 至圖 3-2-27m 為 1gRtest1 試體在不同的垂直錯動距離(△H)，由地表利用雷射位移計掃描地表垂直變位圖。圖 3-2-28a 至圖 3-2-28c 為 1gRtest1 試體在不同的垂直錯動距離(△H)，利用 PIV 分析的地盤變位圖。由 PIV 分析的地表變位圖，可以明顯看出地下土層的變位範圍。

1gRtest2(Dr=45%)的試體高度(H)為 10 cm，斷層由左側向右側沿 60^{o} 錯動，該試驗的最大垂直錯動距離(△H=3.40 cm，△H/H=0.34)。圖 3-2-29a 至圖 3-2-29m 為 1gRtest2 試體在不同的垂直錯動距離(△H)，由壓克力視窗所取得的影像圖，利用這些影像可以觀察斷層跡由岩盤破裂處向地表延伸發展的過程。圖 3-2-30a 至圖 3-2-30m 為 1gRtest2 試體在不同的垂直錯動距離(△H)，由地表利用雷射位移計掃描地表垂直變位圖。圖 3-2-31a 至圖 3-2-31c 為 1gRtest2 試體在不同的垂直錯動距離(△H)，利用 PIV 分析的地盤變位圖。由 PIV 分析的地表變位圖，可以明顯看出地下土層的變位範圍；上覆土層較厚的試體，有較大的影響範圍。

圖 3-2-32 及圖 3-2-33 分別為 1gRtest1(試體厚度 20 cm)及 1gRtest2(試體厚度 10 cm)在不同斷層垂直錯動距離(△H)時，以斷層尖端尚未出露之點作為為零點，來描述地表的頂升曲線。圖中箭頭分別指出這兩個試驗的地表劇烈變形的範圍，覆土層厚度 10 cm 時，地表劇烈變形的範圍(W)約 10 cm；而覆土層厚度 20 cm 時，地表劇烈變形的範圍約 20 cm。因此 60 度的斷層角，造成地表劇烈變形的範圍約和覆土層的厚度相當。

圖 3-2-34a 至圖 3-2-34e 為 1gRtest3(Dr=70%，試體高度 10 cm)試體在不同的垂直錯動抬升量(△H)下，由壓克力視窗及試體頂部所取得的 PIV 影像圖。圖 3-2-35 為 1gRtest3(試體厚度 10 cm，Dr=70%)在不同斷層垂直錯動距離(△H)時，以斷層尖端尚未出露之點作為為零點，來描述地表的頂升曲線。圖中箭頭分別指出這兩個試驗的地表劇烈變形的範圍，覆土層厚度 10 cm 時，地表

劇烈變形的範圍約 10 cm，與相對密度 40%的 1gRtest2 試體相當，因此初步推論 60 度的斷層角，造成地表劇烈變形的範圍(W)約和覆土層的厚度相當，此結論與 Lin *et al*. 2006(圖 3-2-3)所得結論一致；而相對密度的大小，在目前的研究資料，並不會顯著影響表土層劇烈變形的範圍，W。圖 3-2-36 為 1gRtest4 在不同垂直錯動量，斷層跡的發展情形。圖 3-2-37 則為 1gRtest4 不同斷層垂直錯動抬升量，地表的頂升曲線。

首先定義正規化地表頂升量為地表頂升量除以斷層垂直錯動量。圖 3-2-38、圖 3-2-39、圖 3-2-40 及圖 3-2-41 分別為四個斷層錯動試驗，在不同斷層垂直錯動量下，所得正規化地表頂升量與距斷層尖端出露距離之關係。經由垂直錯量的正規化可以將地表頂升量與距斷層尖端出露距離整合成一個合理的關係。另外由前面的討論造成地表劇烈變形的範圍，W 約和覆土層的厚度，H 相當，因此可以利用上覆土層厚度進行上述四圖水平座標的正規化，建立整合四個試驗所得之正規化地表頂升量與正規化距斷層尖端出露距離的關係如圖 3-2-42 所示。未來增加不同深度及離心模型試驗的成果，可以校正該關係的正確性，提供不同斷層垂直錯動量與距斷層尖端出露不同距離之地表垂直頂升量的關係。

2-11. 斷層錯動 10 g 模擬試驗的初步試驗結果

為了掌握覆土層厚度對斷層跡發展及最大斷層影響範圍的影響，因此將完成的斷層模擬試驗箱，製備相對密度(70%)、20 cm 厚度的砂床，在 10 g 的離心加速度下，進行 60^{o} 斷層角的逆斷層錯動試驗。該模型的原型尺寸等於 2 m 厚的覆土層受到約 35.1 cm 的垂直頂升量。利用前述準備 1g 模型的方法製備 20 cm 的試體床，將試驗箱吊入離心機坑，並裝置 LVDT 量測斷層頂升的垂直變位，聯結頂升馬達的電源線及控制線，透過電滑環(electrical slip ring)與控制室的馬達控制裝置聯絡，因此可以控制高速飛行的模擬試驗箱進行斷層錯動試驗。而 LVDT 所量到的垂直變位，則由位於旋轉臂中心的電腦擷取並記讀，透過旋轉光纖接頭傳至控制室的電腦。

圖 3-2-43 及 44 為固定於離心掛台上的斷層錯動模擬試驗箱，圖 3-2-45 為試驗前，試體床的側視圖。待離心飛行前的安全檢查完成後，開動離心機至 10 g，並保持固定的旋轉速度。隨後開動斷層錯動模擬試驗箱的馬達，開始進行斷層頂升試驗(圖 3-2-46)，由 LVDT 的讀數，可以求得斷層的垂直頂升量。待垂直頂升量達到 3.51 cm，關閉馬達，並停止離心機，最後將試體吊離離心機坑(圖 3-2-47)，利用雷射位移計進行地表變位的掃描。圖 3-2-48 頂升試驗完成試體側視及頂視圖(10gRest1)。

圖 3-2-49 及圖 3-3-50 分別為在 10g 飛行時，斷層頂升 3.51 cm 時，地表頂升曲線及正規化地表的頂升曲線(10gRtest1)。地表變位劇烈變化的範圍約為上覆土層厚度，與 1g 試驗的結果相似。圖 3-2-51 為在 10gRtest1(模型尺寸)及 1gRtest4，斷層頂升 3.51 cm 時及 3.58 cm，正規化地表的頂升曲線的比較，初步看來，在 10g 進行頂升試驗有較大的正規化地表頂升量，但該結論仍待更多的試驗成果來證實。

2-12. 斷層錯動 1g 及 10 g 模擬試驗的初步結論

利用目前逆斷層錯動的 1g 及 10 g 的試驗，可以得到下面的初步成果:

(1) 本計畫所設計的斷層錯動模擬試驗箱，在 1g 及高 g 的試驗條件下，都可以達到設計所需的預期功能；在 1g 的試驗條件下，相關攝影機及照明設施也可以得到不錯的影像資料。在高 g 試驗條件，則仍需考慮輔助光源的使用及使用廣角攝影鏡頭，以便取得最佳的影像以供後續的分析。

(2) 傾角 60^{o} 的斷層角錯動時，在 1g 及 10g 的試驗條件下，地表高程劇烈變化影響範圍約等於覆土層厚度；而相對密度的大小，並不會顯著影響表土層劇烈變形的範圍。 未來整合試驗成果，建立所得之正規化地表頂升量與正規化距斷層尖端出露距離的關係。可以提供不同斷層垂直錯動量與距斷層尖端出露不同距離之地表垂直頂升量的

預測。

(3) 在 10g 進行頂升試驗，相較於 1g 試驗，由於在較高的覆土應力下，有較大的土壤勁度，因此有較大的正規化地表頂升量；而兩者正規化頂升曲線的形狀則類似，都會形成兩個平台。這兩個試驗第一個平台出現在斷層尖端沿 60^{o} 斷層面延伸至地表處，1g 試驗的第二個平台的坡腳有較陡的坡度，可能 1g 試驗存在微小的毛細現象所導致，但這些初期結論仍待更多的試驗成果來證實。

表 3-2-1 試驗土樣之基本物理性質

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 (Dr=40%)	35°
最大乾密度 ρ dmax(g/cm3)	1.66
最小乾密度 ρ dmin(g/cm3)	1.38
統一土壤分類	SP

表 3-2-2 1-g 正斷層錯動模型試驗種類

試驗種類	覆土層相對密度 (Dr)	覆土層厚度(cm)	試驗目的
1gNtest1	45	10	1. 斷層跡出露地表所需的最小垂直錯動量 2. 不同垂直錯動量對地表及地下變位剖面的影響 3. 不同垂直錯動量對地表錯動範圍的影響
1gNtest2	45	20	
1gNtest3	45	25	
1gNtest4	70	10	
1gNtest5	70	20	
1gNtest6	70	25	
10gRtest1	70	20 (2 m)	1. 地表及地下變位剖面

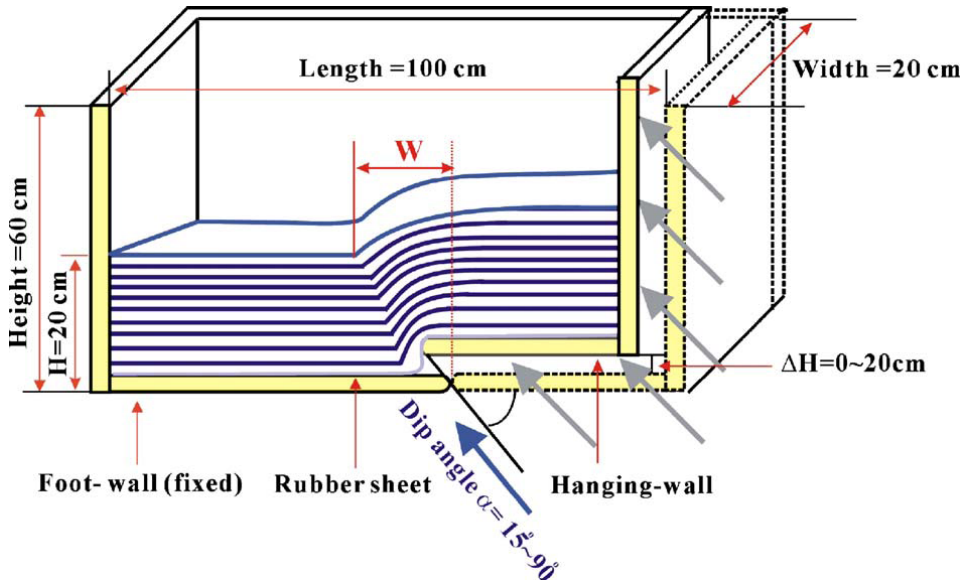


圖 3-2-1 1g 逆斷層砂箱模型試驗示意圖(摘自 Lin et al. 2006)

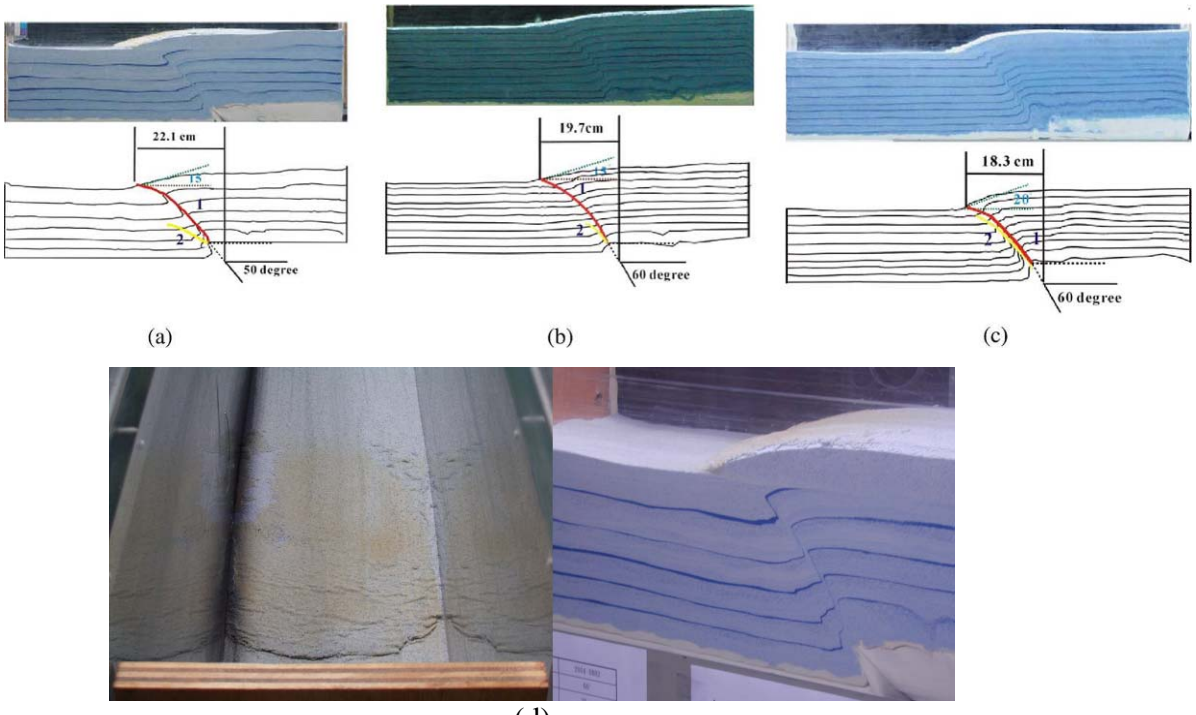


圖 3-2-2 不同逆斷層傾角與斷層錯動範圍的試驗結果(摘自 Lin et al. 2006)

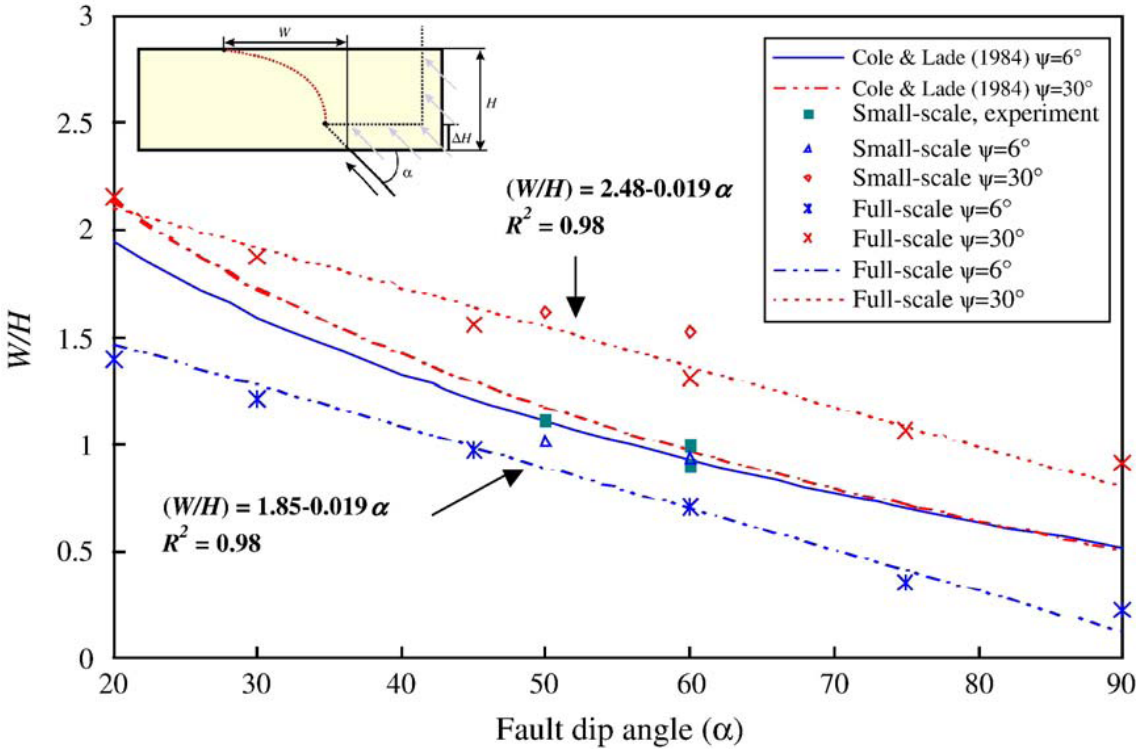


圖 3-2-3 逆斷層傾角與斷層錯動範圍關係(摘自 Lin *et al*. 2006)

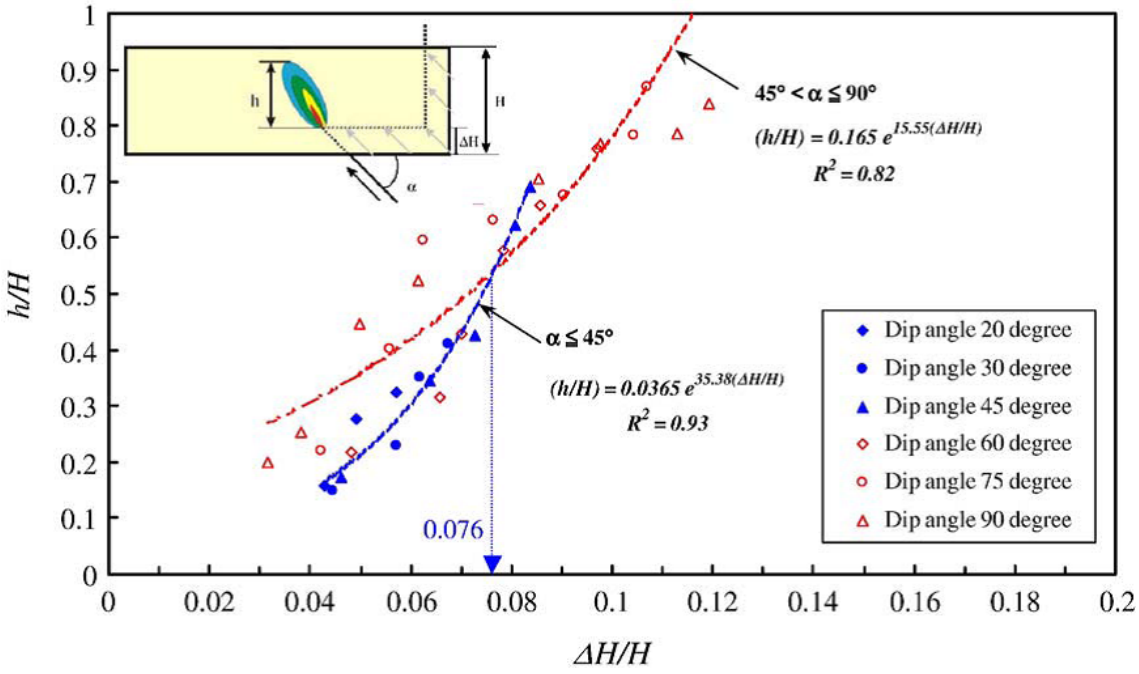


圖 3-2-4 逆斷層抬升距離與斷層破裂跡發展長度關係(摘自 Lin *et al*. 2006)

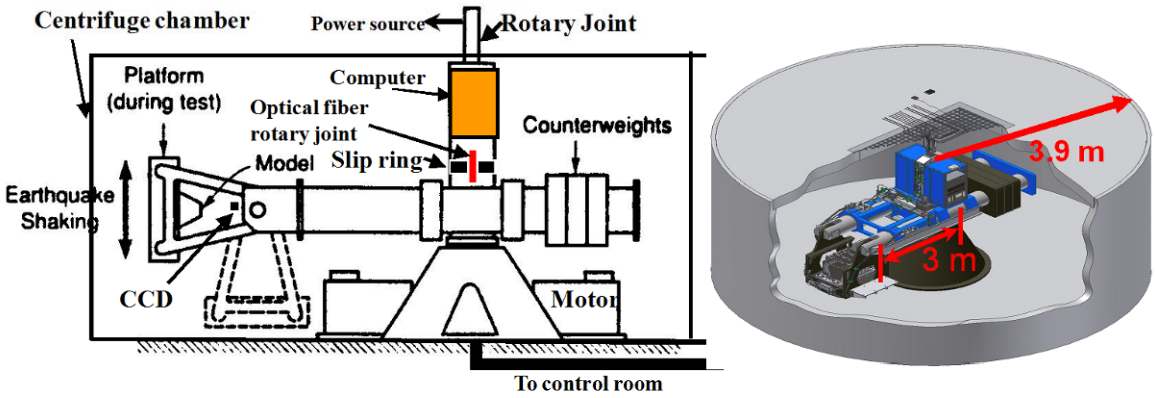


圖 3-2-5 中央大學離心機示意圖

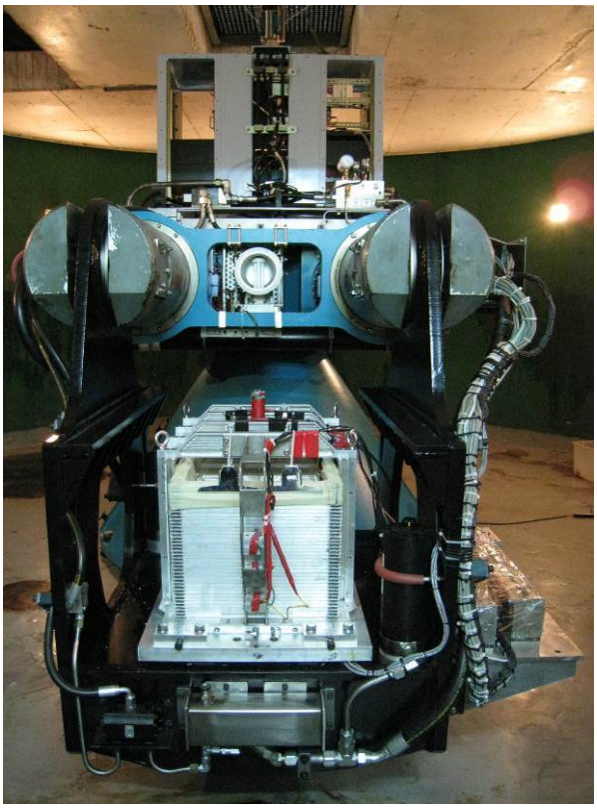


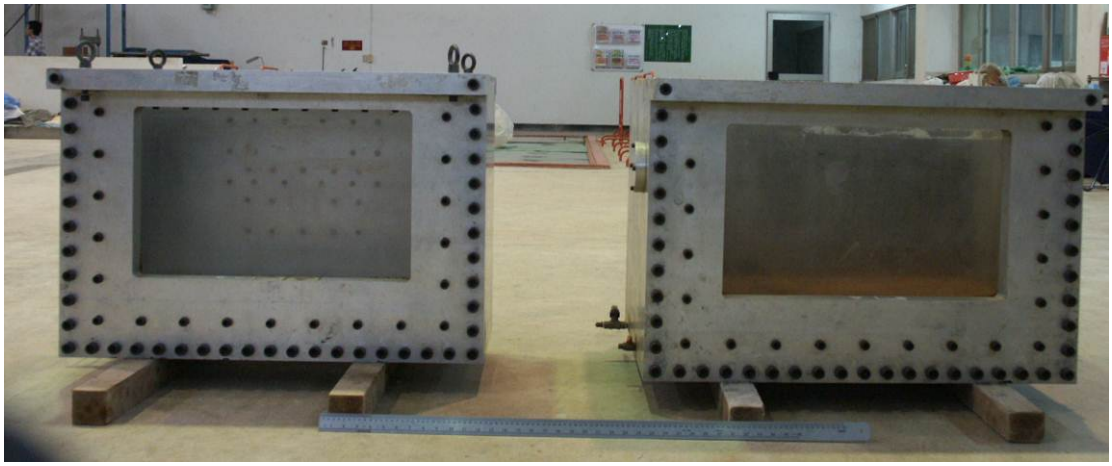
圖 3-2-6 中央大學離心機掛台與 1-D 振動台掛台



(a)積層版試驗箱

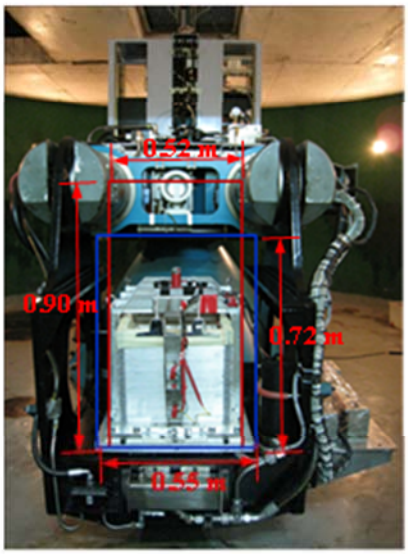


(b)固壁式試驗箱

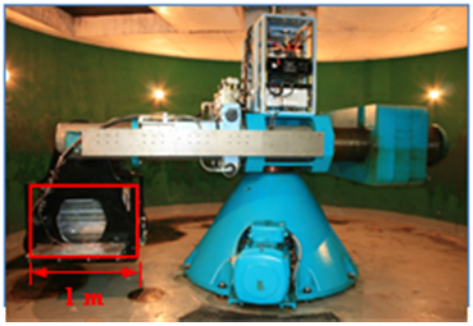


(c) 2-D 及 3-D 固壁式試驗箱

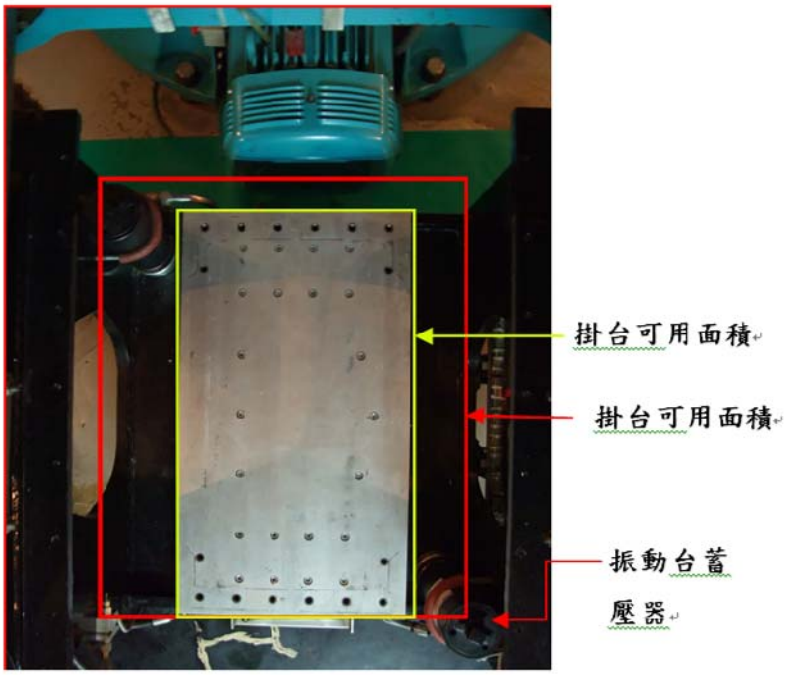
圖 3-2-7 中央大學土木系現有離心模型試驗箱



(a)高寬限制



(b)長度限制



(c)掛台頂視圖

圖 3-2-8 中央大學離心機掛台空間的限制

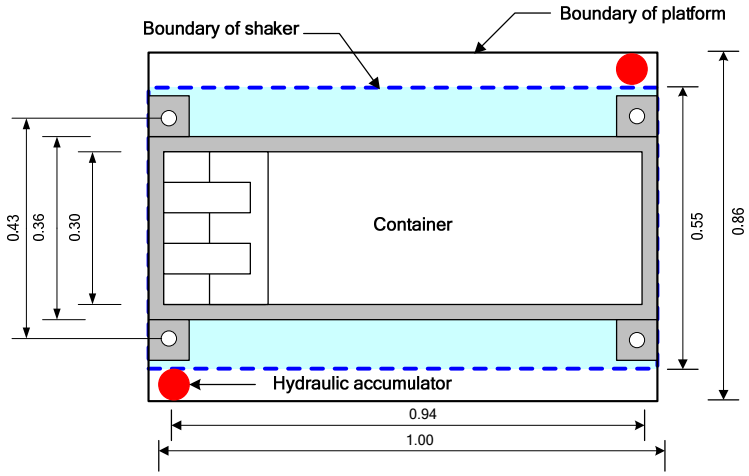
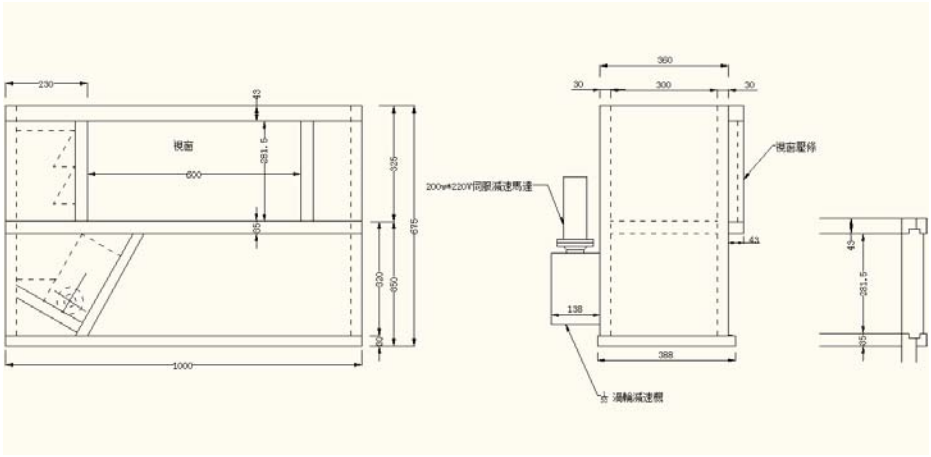
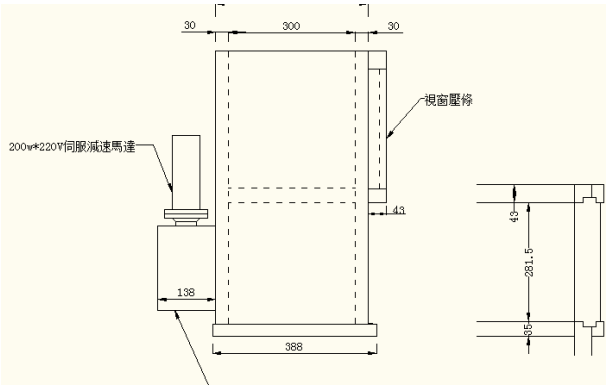


圖 3-2-9 中央大學離心機掛台空間的限制(unit : m)



(a) 斷層模擬試驗箱前視圖



(b) 斷層模擬試驗箱側視圖

圖 3-2-10 (a)斷層模擬試驗箱前視圖; (b) 斷層模擬試驗箱側視圖 (單位: mm)

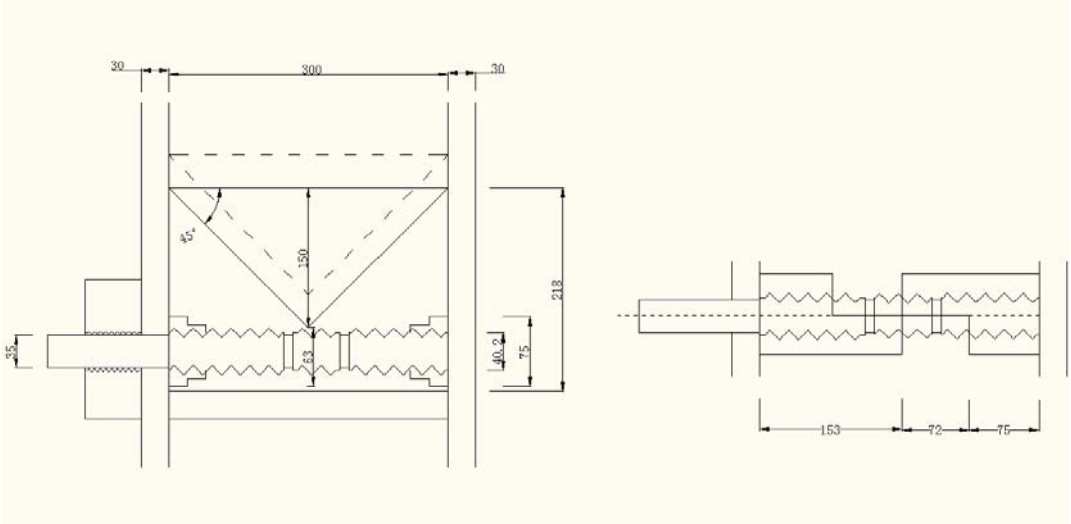


圖 3-2-11 斷層頂升或下降機構

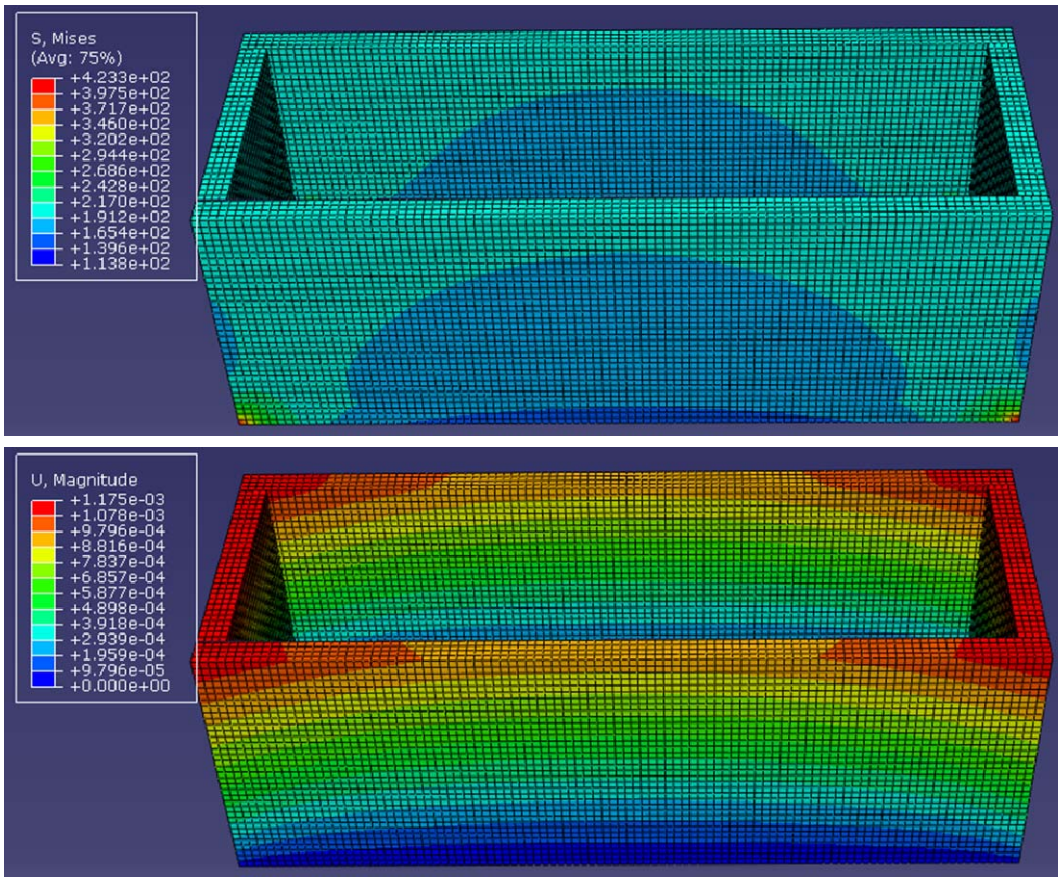


圖 3-2-12 試驗箱 80g 應力分析

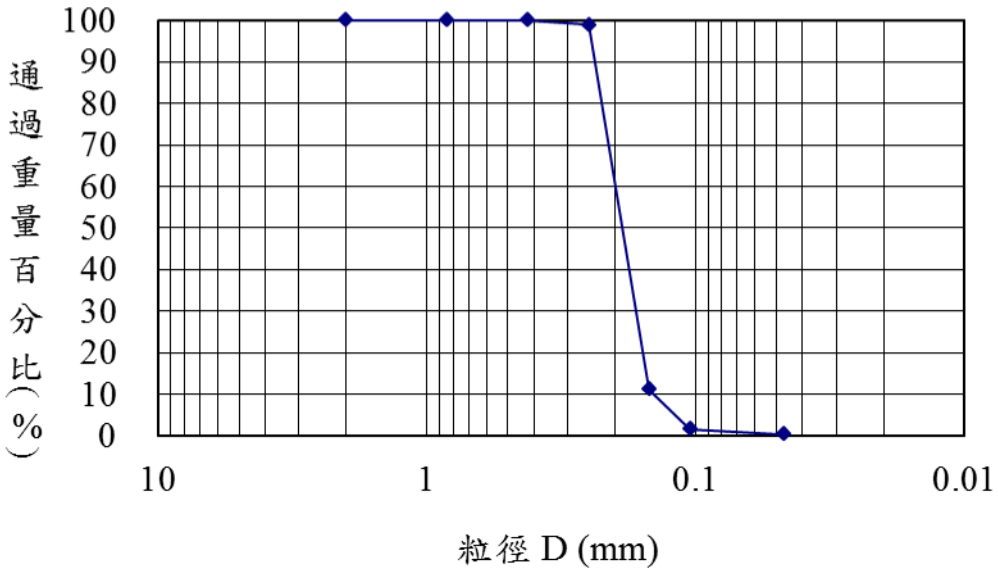


圖 3-2-13 試驗土樣之粒徑分佈圖



圖 3-2-14 試驗土樣放大兩百倍之顯微攝影圖

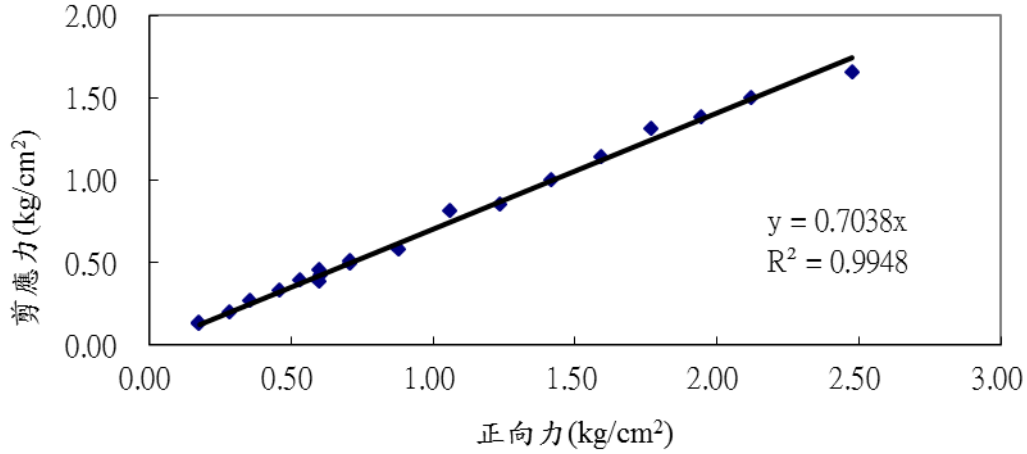


圖 3-2-15 直接剪力試驗相對密度 40 % 正向力與剪應力之關係

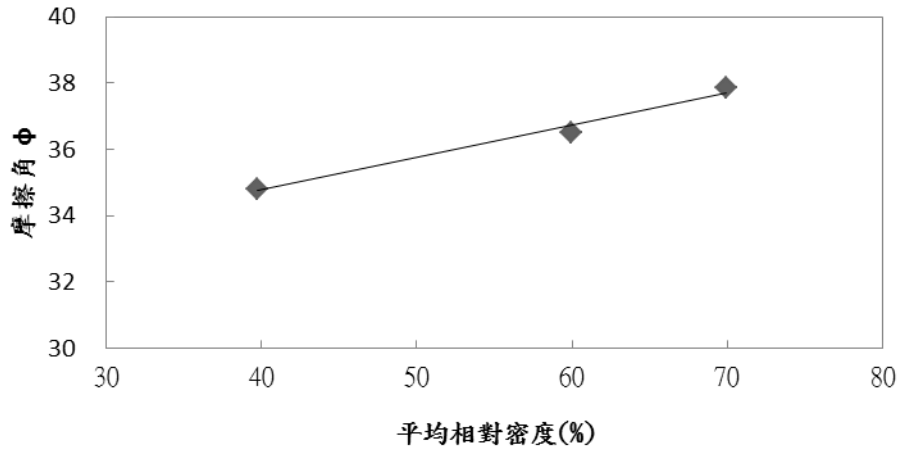


圖 3-2-16 直接剪力試驗相對密度與摩擦角之關係

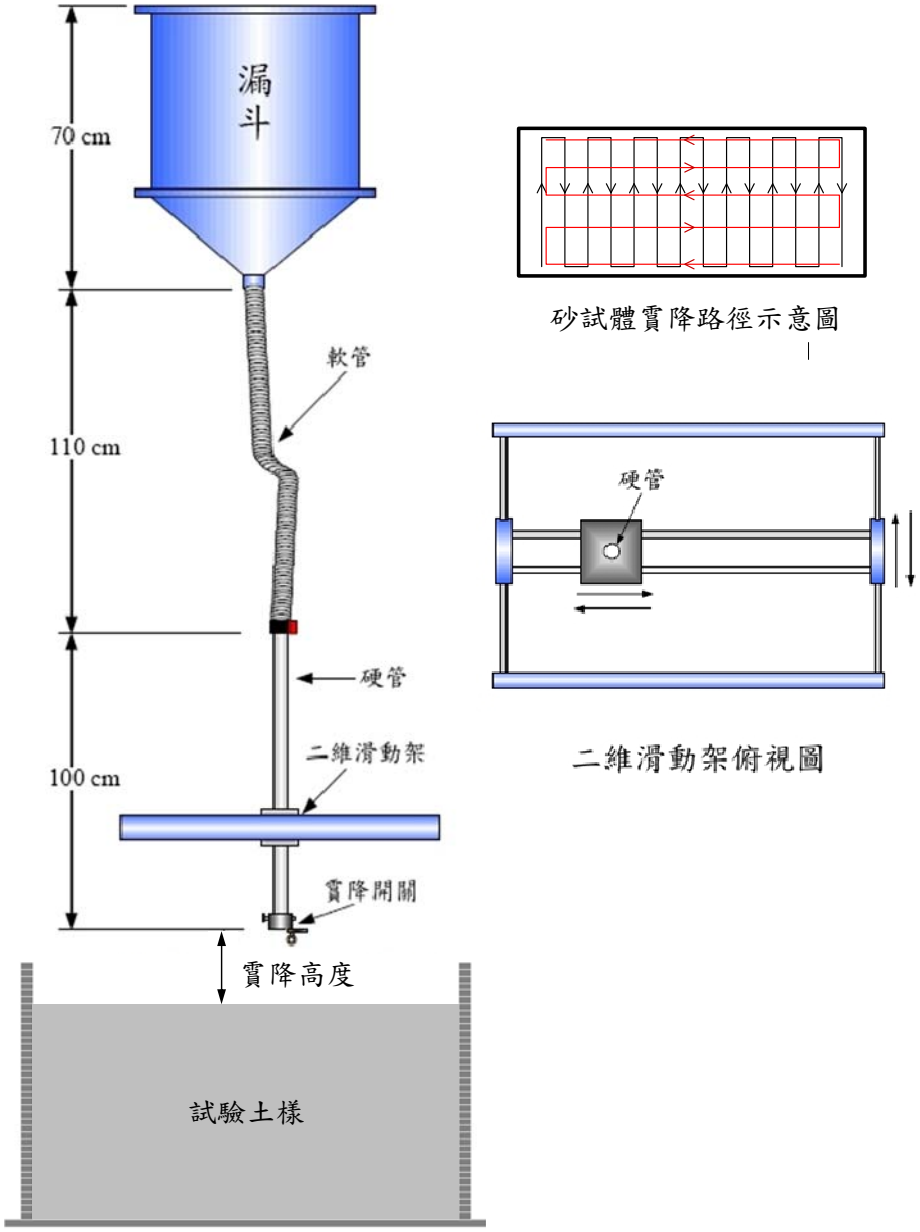


圖 3-2-17 移動式實降機之示意圖



圖 3-2-18 移動式實降機實景



圖 3-2-19 盛土漏斗

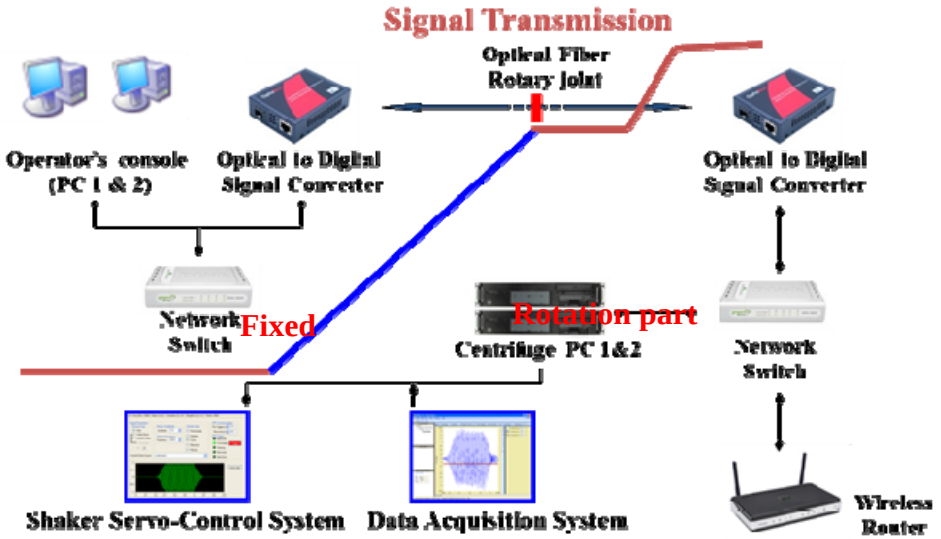


圖 3-2-20 振動台控制及資料擷取系統的傳輸構成

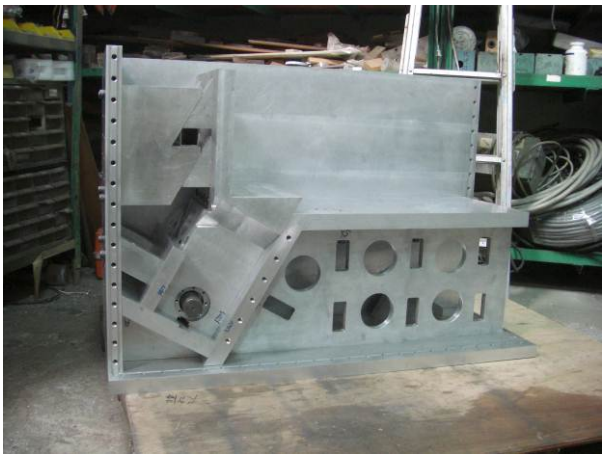


圖 3-2-21 斷層模擬試驗箱的側視圖

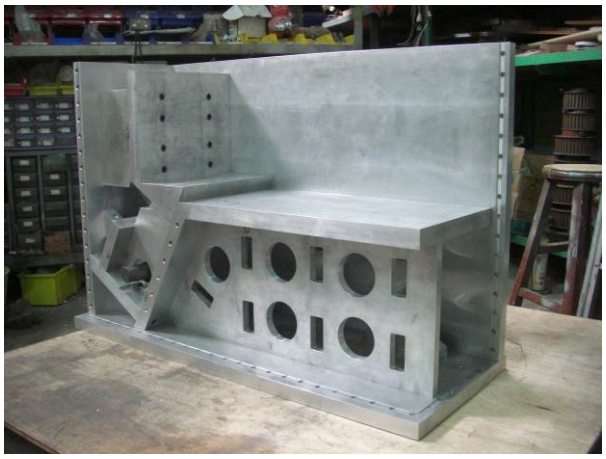


圖 3-2-22 斷層模擬試驗箱的斜視圖

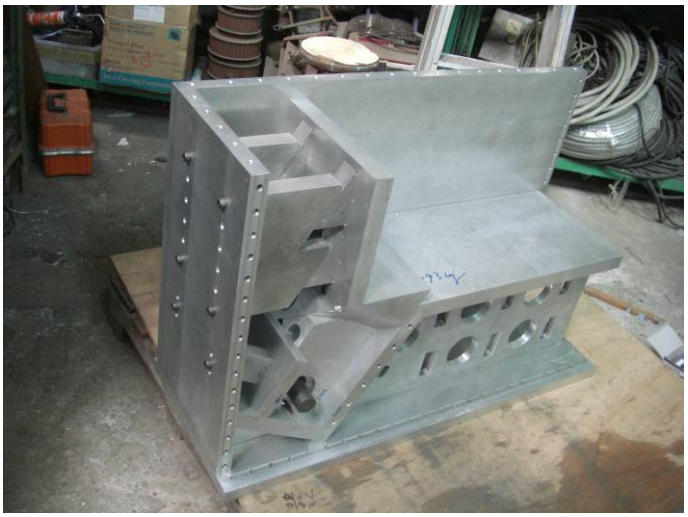


圖 3-2-23 斷層模擬試驗箱的斜視圖

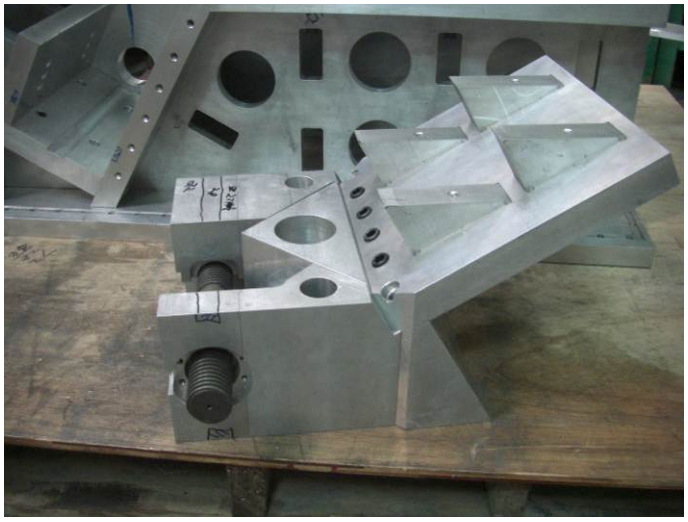


圖 3-2-24 斷層模擬試驗箱的斷層頂升塊頂升級下降機構

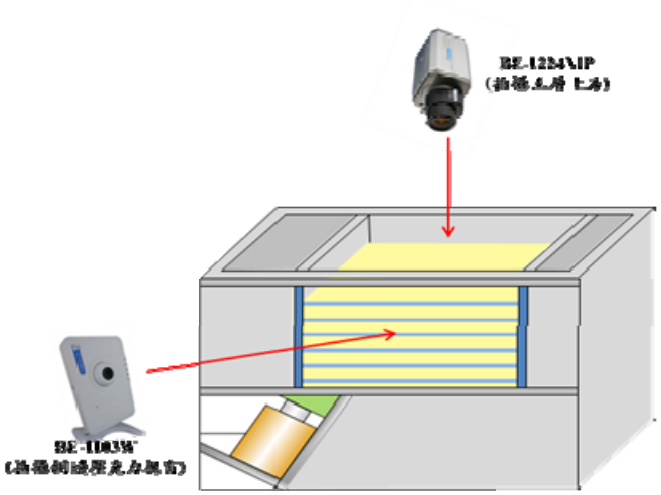
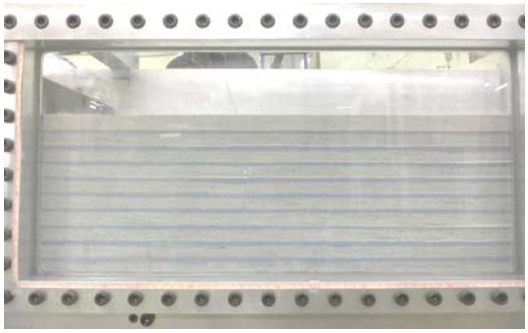
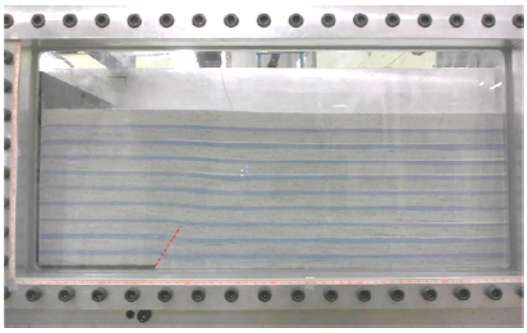


圖 3-2-25 斷層模擬試驗箱的影像拍攝



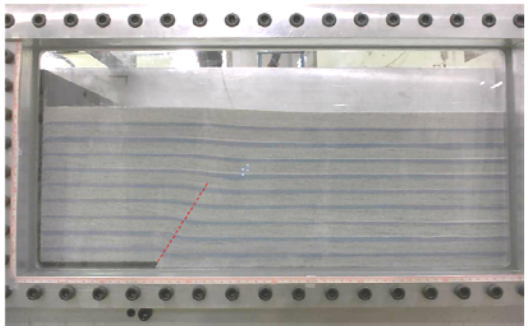
垂直抬升量　0 cm　水平推移量　0 cm

(a)



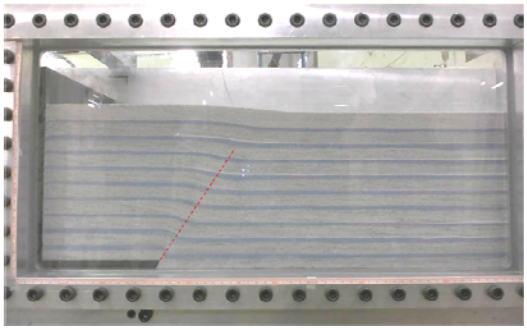
垂直抬升量　0. 56 cm　水平推移量　0.32 cm

(b)



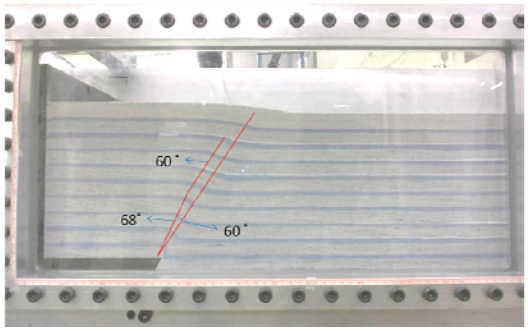
垂直抬升量　0.85 cm 水平推移量　0.49 cm

(c)



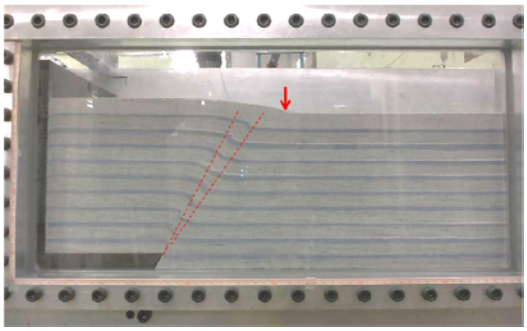
垂直抬升量　1.19 cm　水平推移量　0.69 cm

(d)



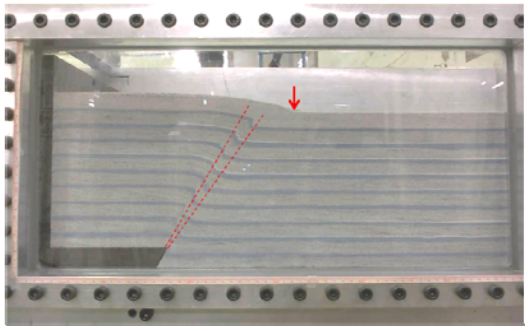
垂直抬升量　1.60 cm 水平推移量　0.92 cm

(e)



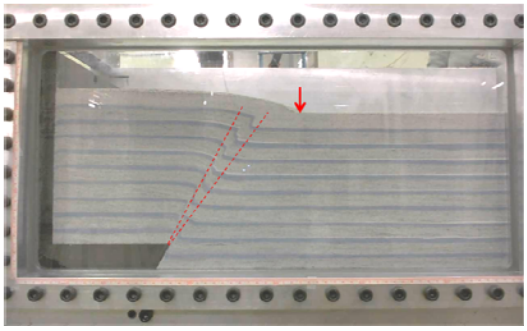
垂直抬升量　2.19 cm　水平推移量　1.26 cm

(f)



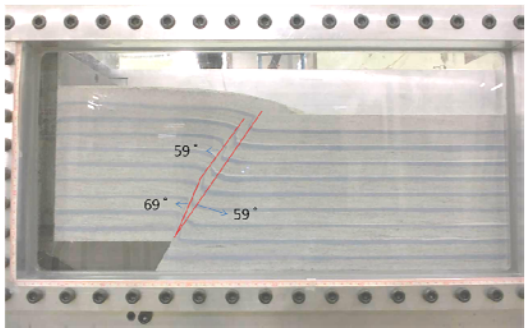
垂直抬升量　2.78 cm 水平推移量　1.60 cm

(g)



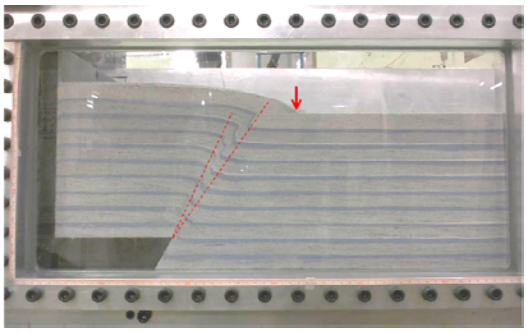
垂直抬升量　3.37 cm　水平推移量　1.95 cm

(h)



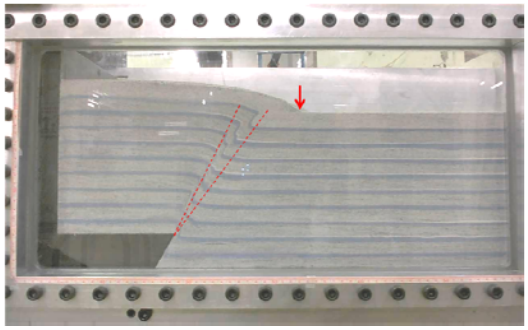
垂直抬升量　3.90 cm　水平推移量　2.25 cm

(i)



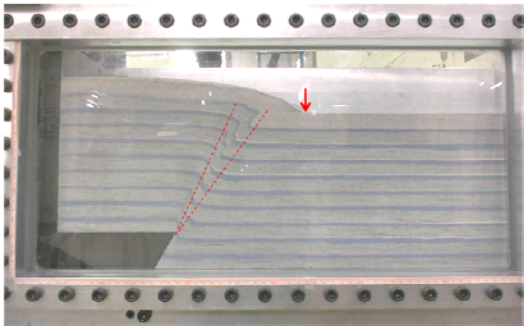
垂直抬升量　4.17 cm　　水平推移量　2.41 cm

(j)



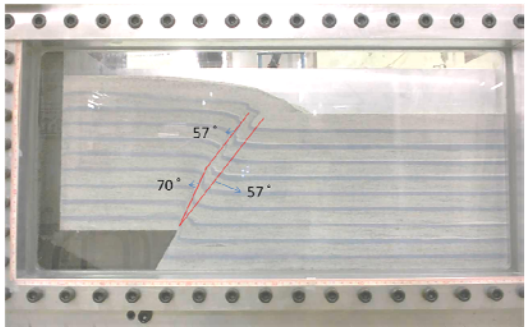
垂直抬升量　4.45 cm　水平推移量　2.57 cm

(k)



垂直抬升量　4.72 cm　　水平推移量　2.72 cm

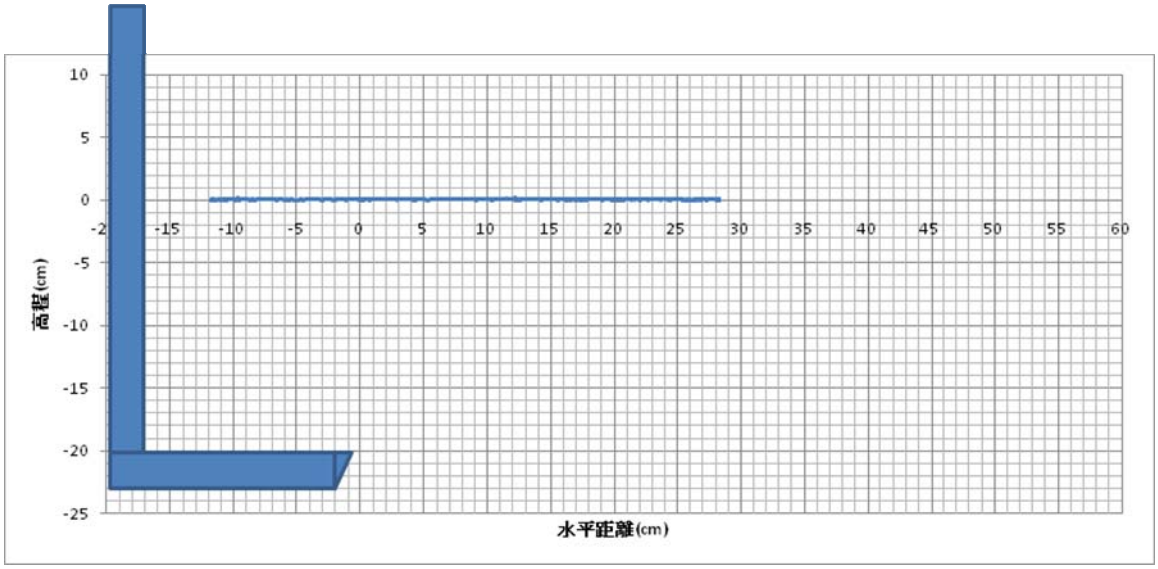
(l)



垂直抬升量　5.10 cm　水平推移量　2.93 cm

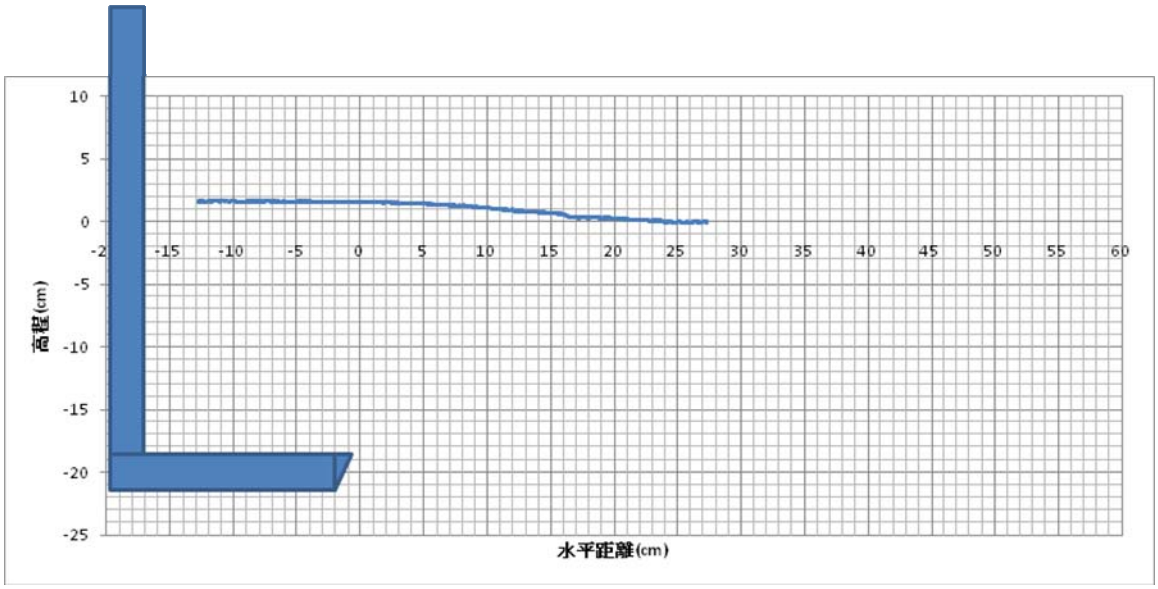
(m)

圖 3-2-26 斷層錯動在不同錯動位移斷層跡的發展影像(1gRtest1)



垂直抬升量　0 cm　　水平推移量　0 cm

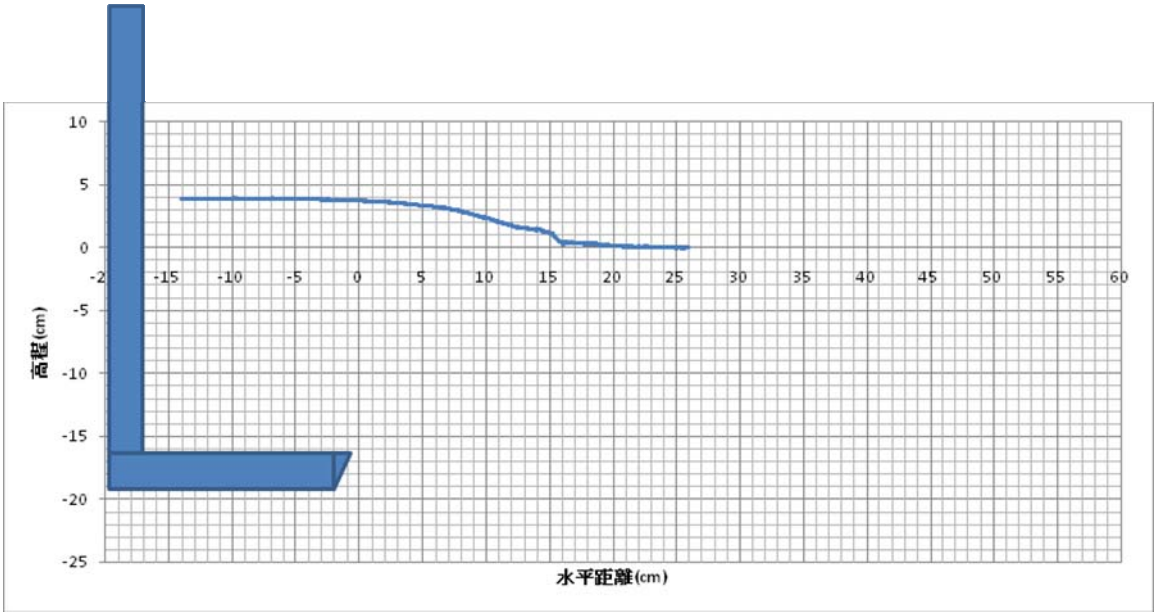
(a)



垂直抬升量　1.60 cm　　水平推移量　0.92 cm

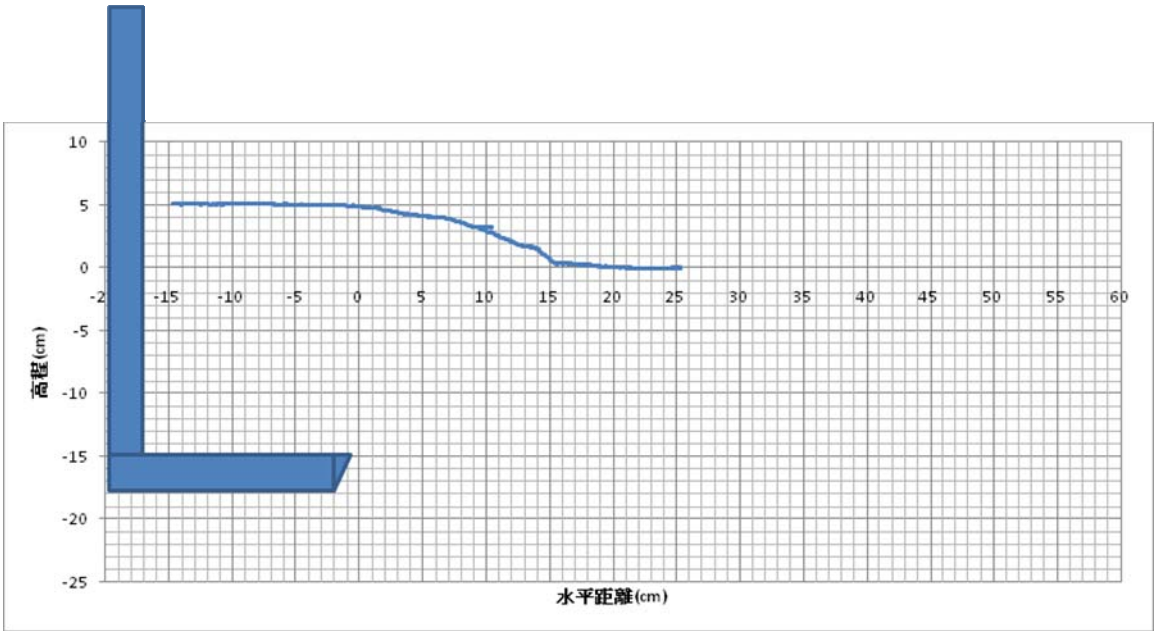
(b)

圖 3-2-27 斷層錯動在不同錯動位移地表的垂直變位(1gRtest1)



垂直抬升量　3.90 cm　　水平推移量　2.25 cm

(c)

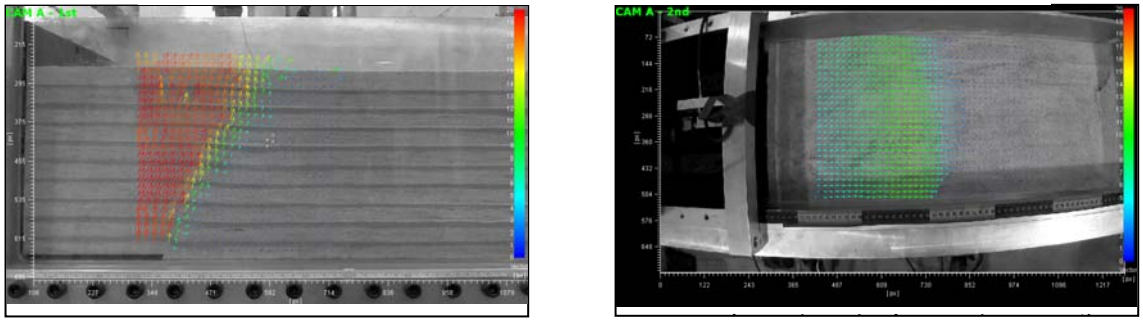


垂直抬升量　5.10 cm　　水平推移量　2.93 cm

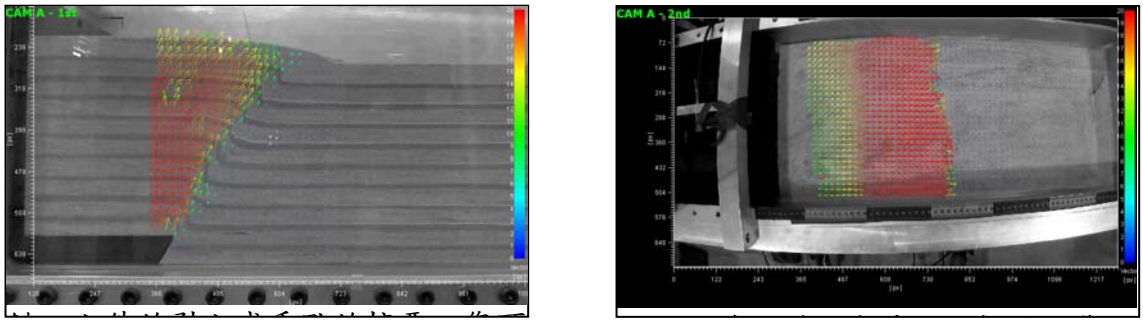
(d)

圖 3-2-27 斷層錯動在不同錯動位移地表的垂直變位(1gRtest1)(續)

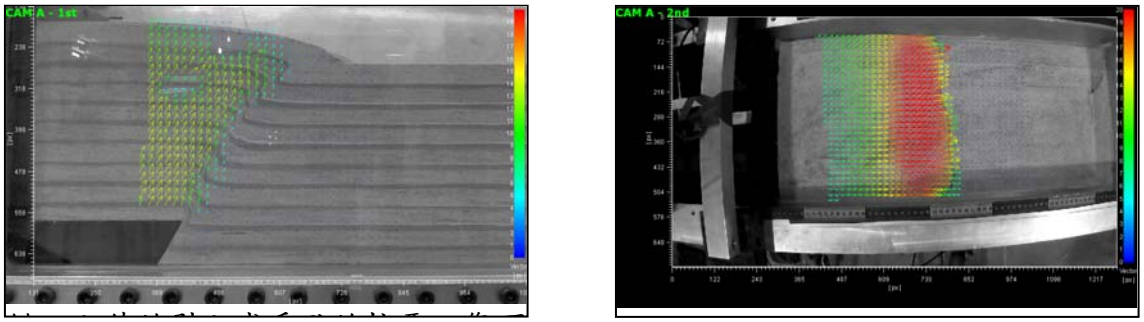
地層的位移向量　　地表的水平變位向量



垂直抬升量　1.60 cm　　水平推移量　0.92 cm
(a)

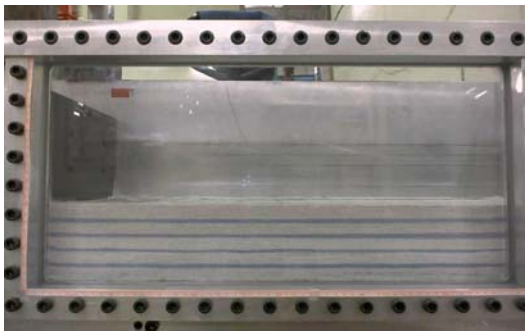


垂直抬升量　3.90 cm　　水平推移量　2.25 cm
(b)



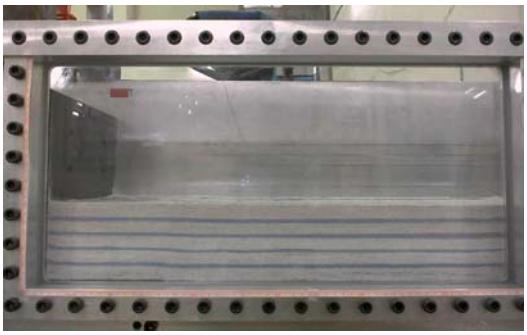
垂直抬升量　5.10 cm　　水平推移量　2.93 cm
(c)

圖 3-2-28 PIV 分析斷層錯動在不同錯動位移地層及地表的變位(1gRtest1)



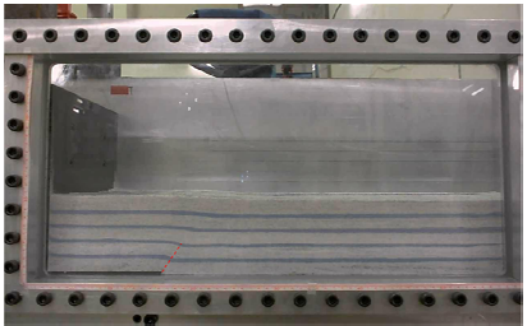
垂直抬升量　0cm 水平推移量　0　cm

(a)



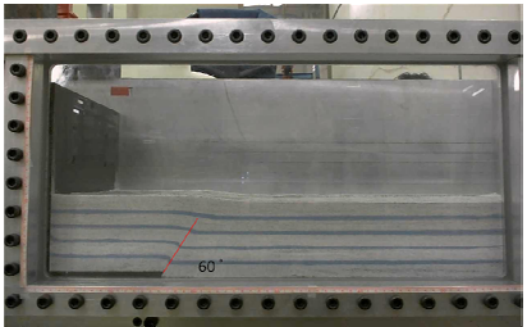
垂直抬升量　0.27cm 水平推移量　0.16　cm

(b)



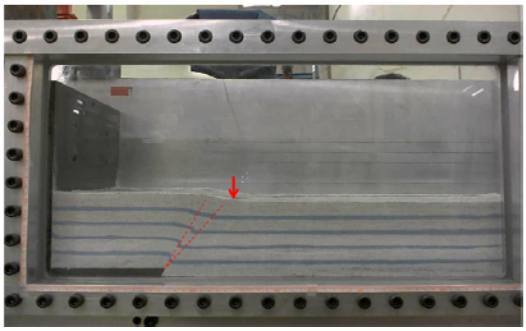
垂直抬升量　0.54 cm 水平推移量 0.32　cm

(c)



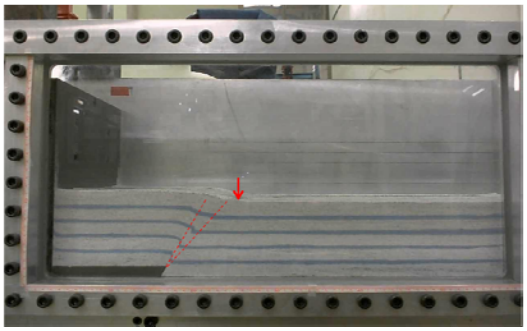
垂直抬升量　0.82　cm 水平推移量 0.47　cm

(d)



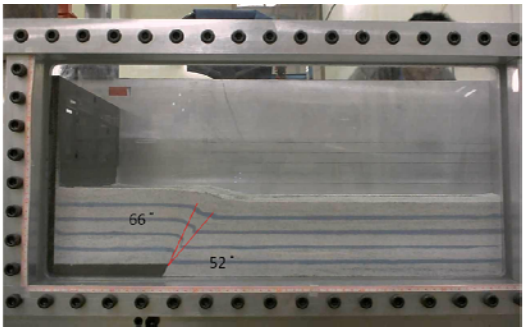
垂直抬升量　1.17 cm 水平推移量　0.68 cm

(e)



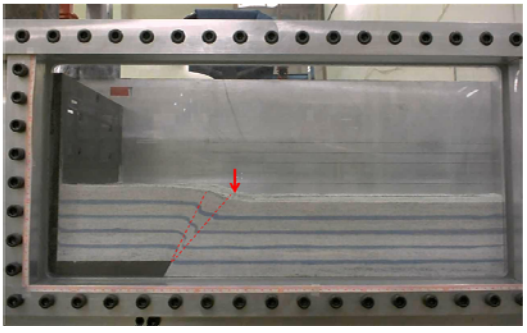
垂直抬升量　1.43 cm 水平推移量　0.82 cm

(f)



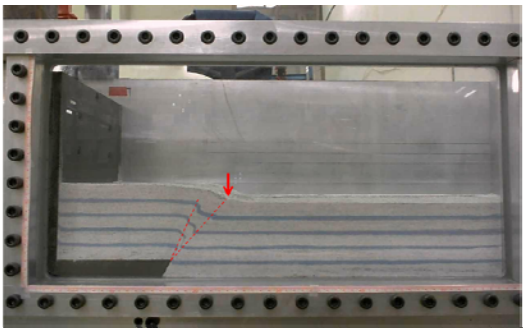
垂直抬升量　1.68 cm 水平推移量　0.97 cm

(g)



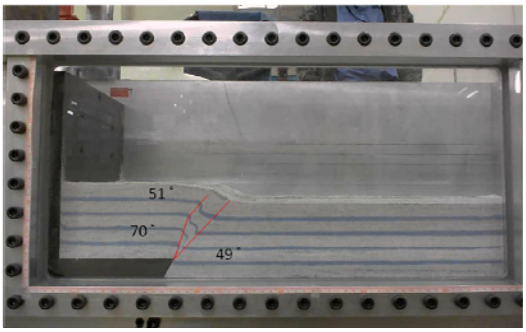
垂直抬升量　2.03 cm 水平推移量　1.17 cm

(h)



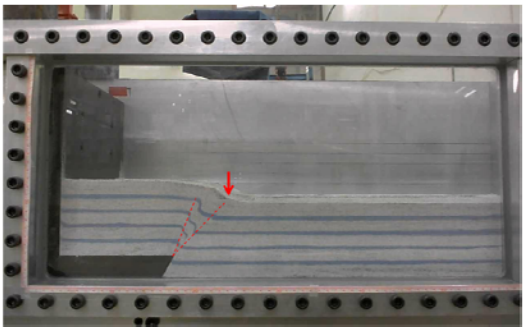
垂直抬升量　2.27 cm　水平推移量　1.31 cm

(i)



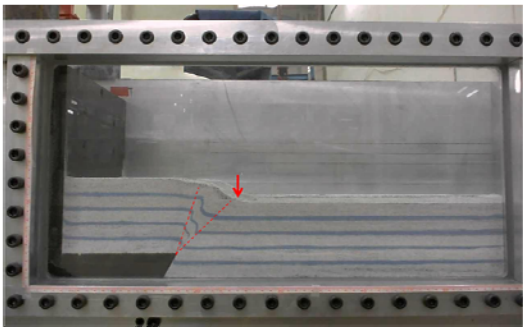
垂直抬升量　2.52 cm　水平推移量　1.46 cm

(j)



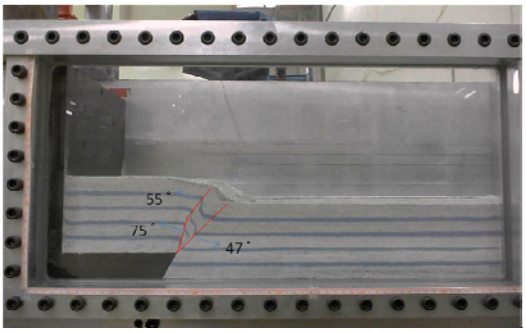
垂直抬升量　2.86 cm　水平推移量　1.65 cm

(k)



垂直抬升量　3.11 cm　水平推移量　1.79 cm

(l)

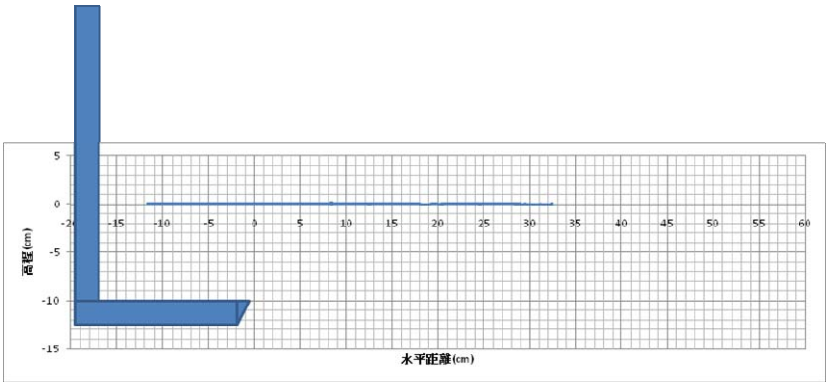


垂直抬升量　3.11 cm　水平推移量　1.79 cm

(m)

圖 3-2-29 斷層錯動在不同錯動位移斷層跡的發展影像(1gRtest2)

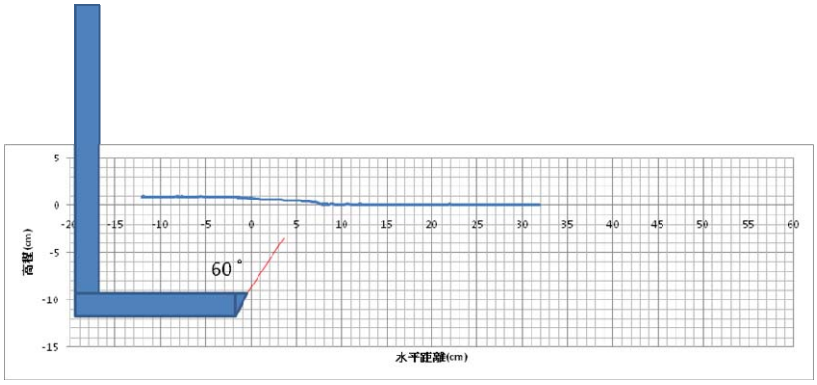
頂升鈑



垂直抬升量　0 cm　　水平推移量　0 cm

(a)

頂升鈑

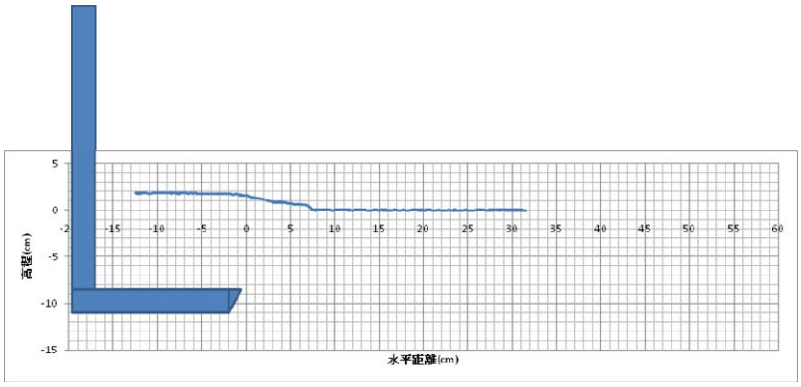


垂直抬升量　0.82 cm　　水平推移量　0.47 cm

(b)

圖 3-2-30 斷層錯動在不同錯動垂直抬升量地表的垂直變位(1gRtest2)

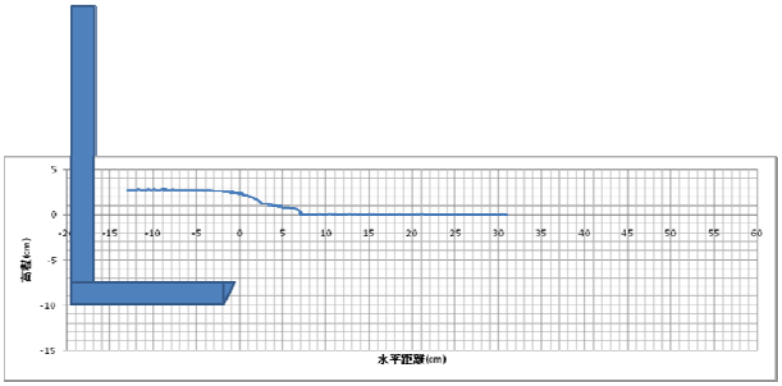
頂升鈑



垂直抬升量　1.68 cm　　水平推移量　0.97 cm

(c)

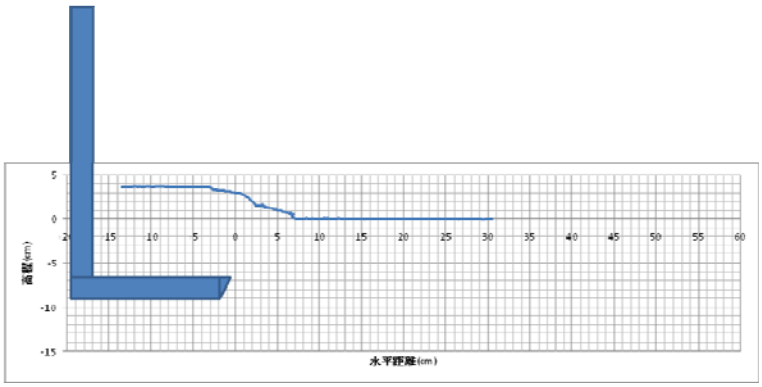
頂升鈑



垂直抬升量　2.52 cm　　水平推移量　1.46 cm

(d)

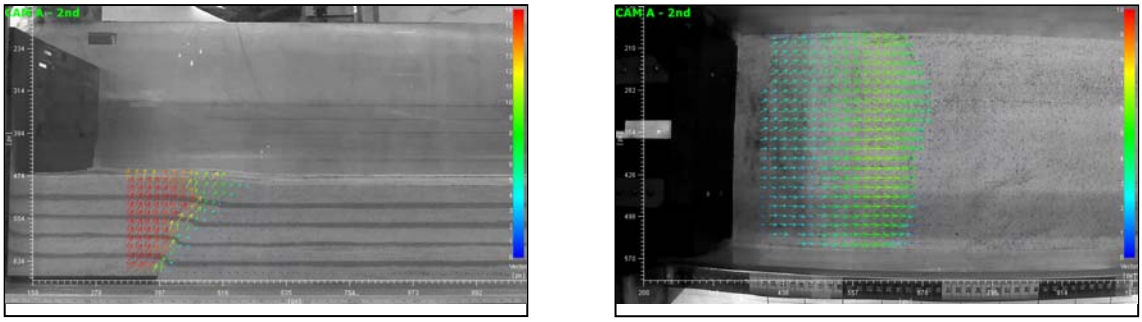
頂升鈑



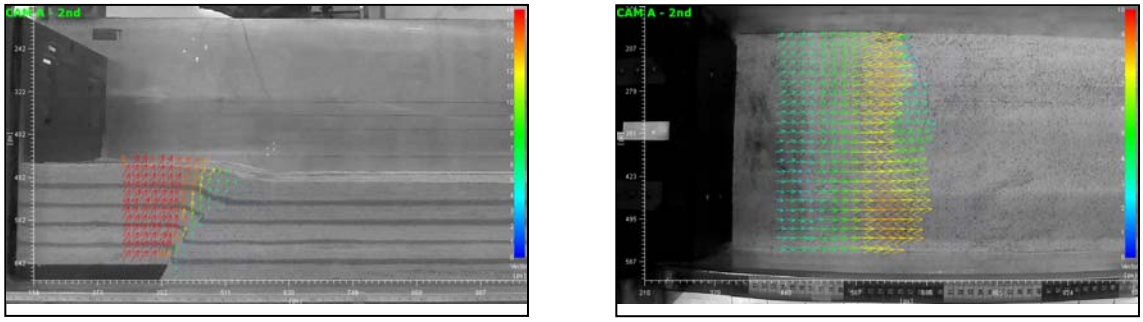
垂直抬升量　2.52 cm　　水平推移量　1.46 cm

(d)

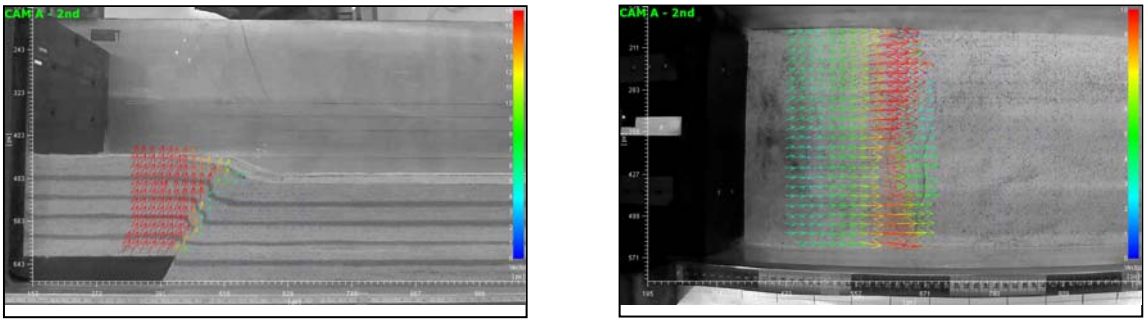
圖 3-2-30 斷層錯動在不同錯動垂直抬升量地表的垂直變位(1gRtest2)(續)



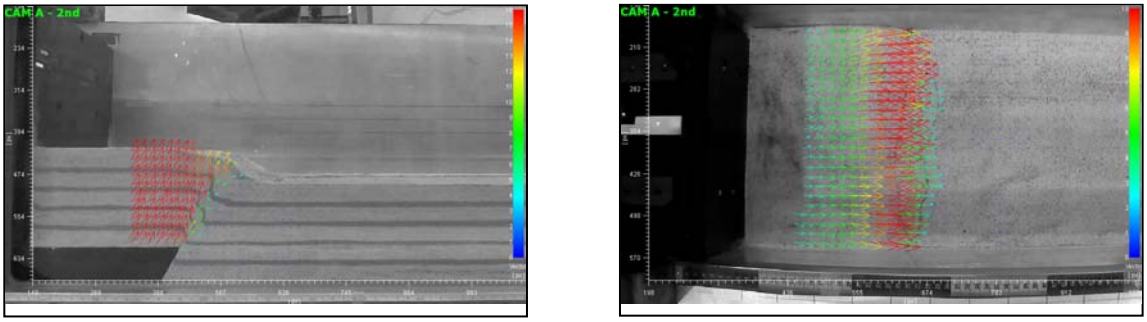
垂直抬升量　0.82 cm　　水平推移量　0.47 cm



垂直抬升量　1.68 cm　　水平推移量　0.97 cm



垂直抬升量　2.52 cm　　水平推移量　1.46 cm



垂直抬升量　3.40 cm　　水平推移量　1.96 cm

圖 3-2-31 PIV 分析斷層錯動在不同錯動抬升量地層及地表的變位(1gRtest2)

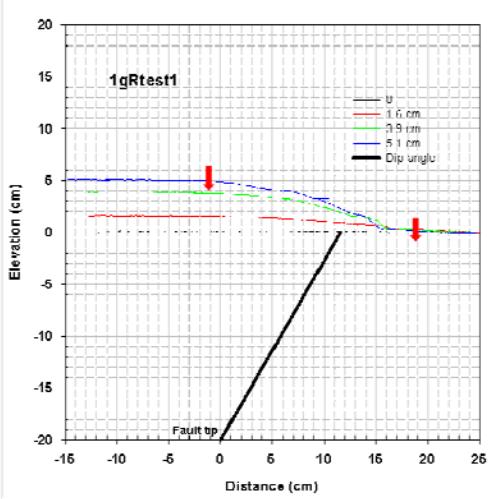


圖 3-2-32 不同斷層垂直錯動抬升量，地表的頂升曲線(1gRtest1)

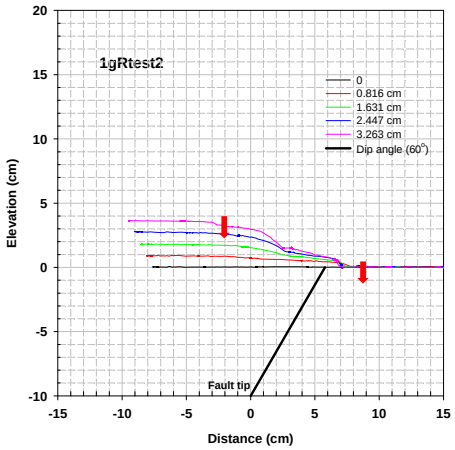
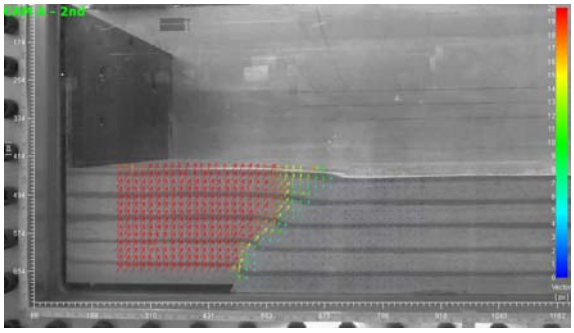
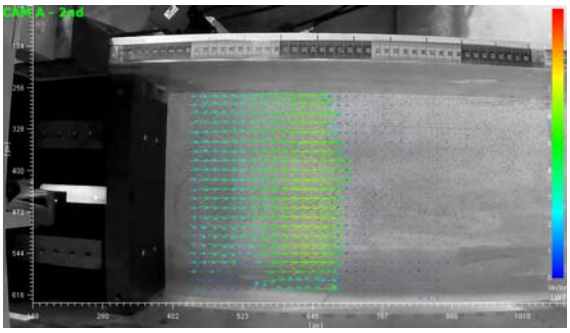
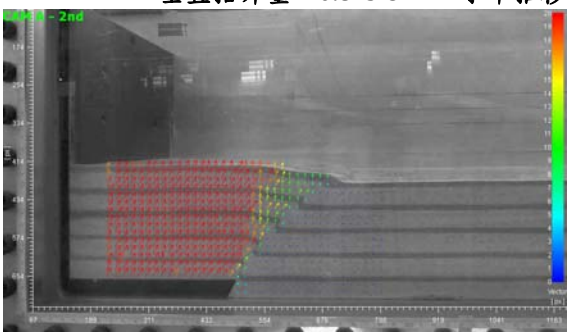


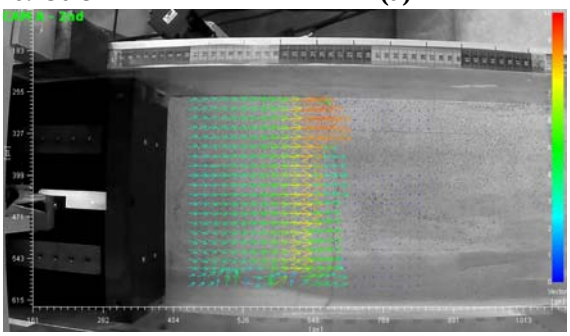
圖 3-2-33 不同斷層垂直錯動抬升量，地表的頂升曲線(1gRtest2)



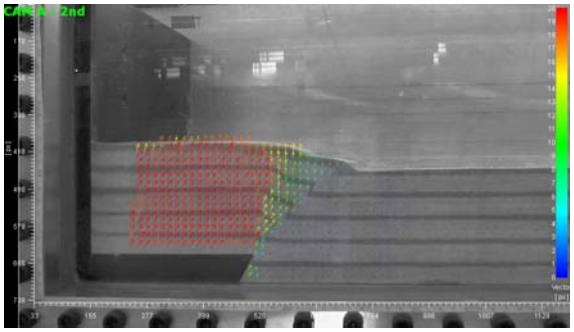


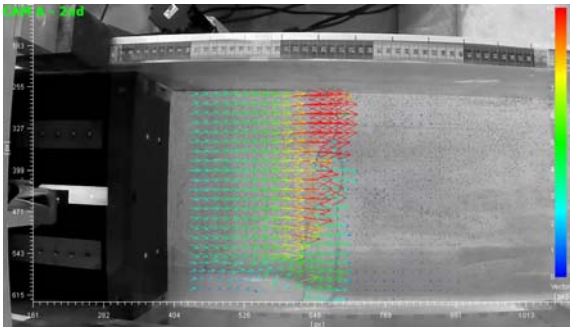
垂直抬升量 0.849 cm 水平推移量 0.490 cm (a)





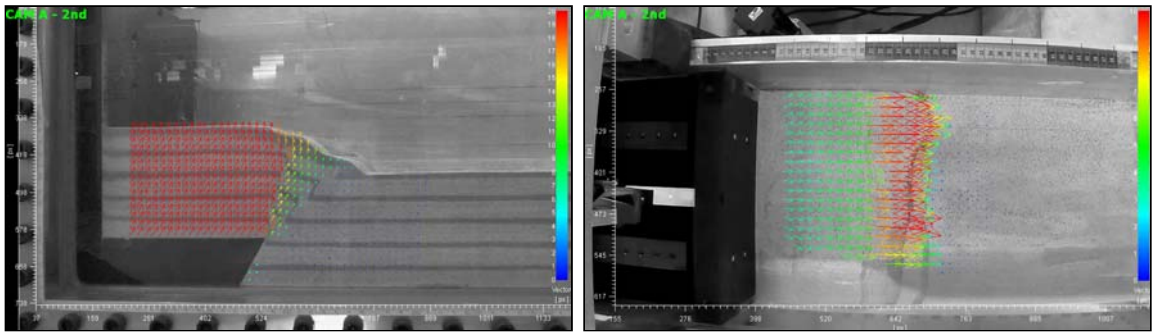
垂直抬升量 1.698 cm 水平推移量 0.980 cm (b)





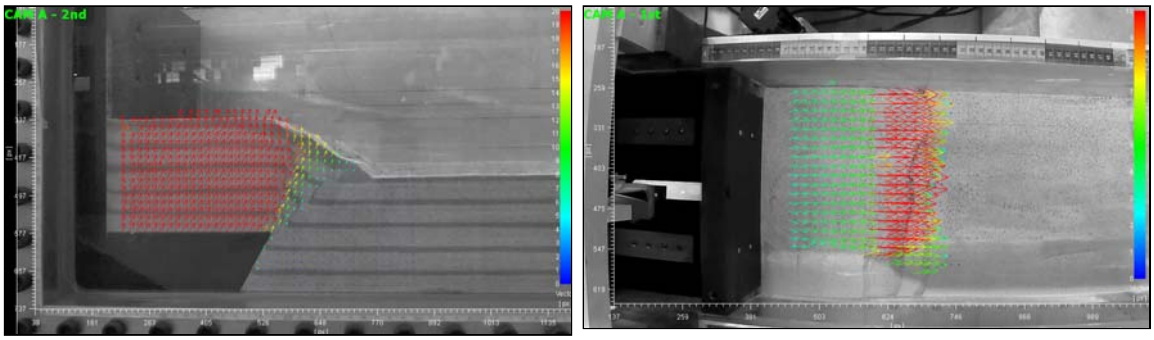
垂直抬升量 2.548 cm 水平推移量 1.471 cm (c)

圖 3-2-34 PIV 分析斷層錯動在不同錯動抬升量地層及地表的變位(1gRtest3)



垂直抬升量　3.397 cm　　水平推移量　1.961 cm

(d)



垂直抬升量　4.321 cm　　水平推移量　2.49 cm

(e)

圖 3-2-34 PIV 分析斷層錯動在不同錯動抬升量地層及地表的變位(1gRtest3)(續)

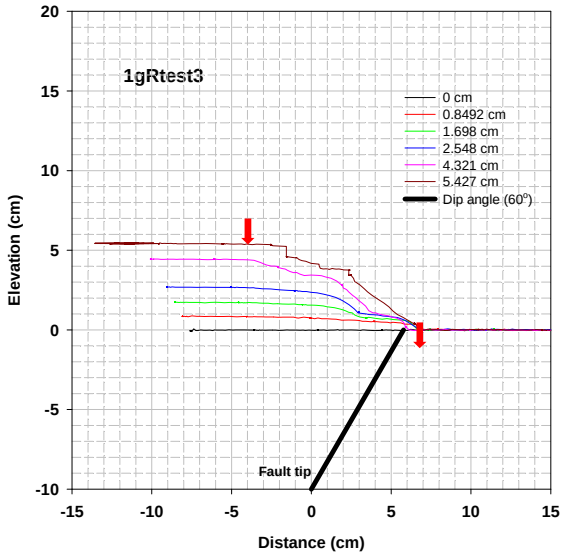
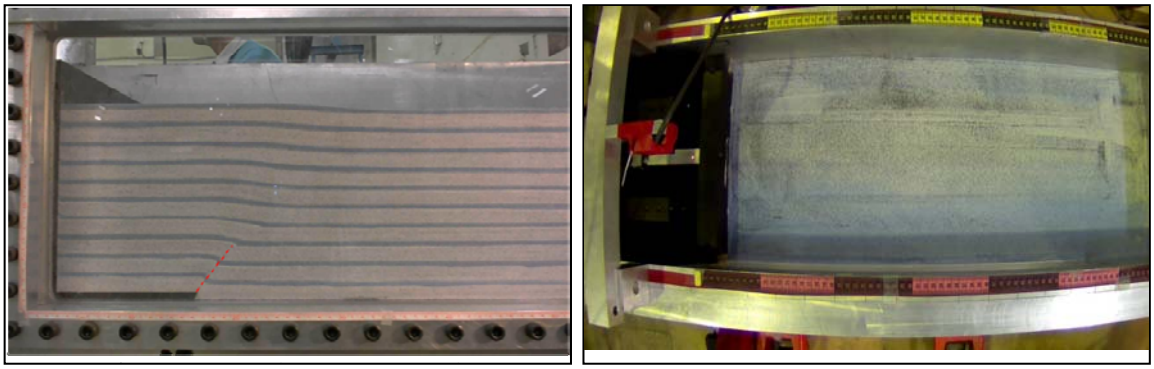


圖 3-2-35 不同斷層垂直錯動抬升量，地表的頂升曲線(1gRtest3)



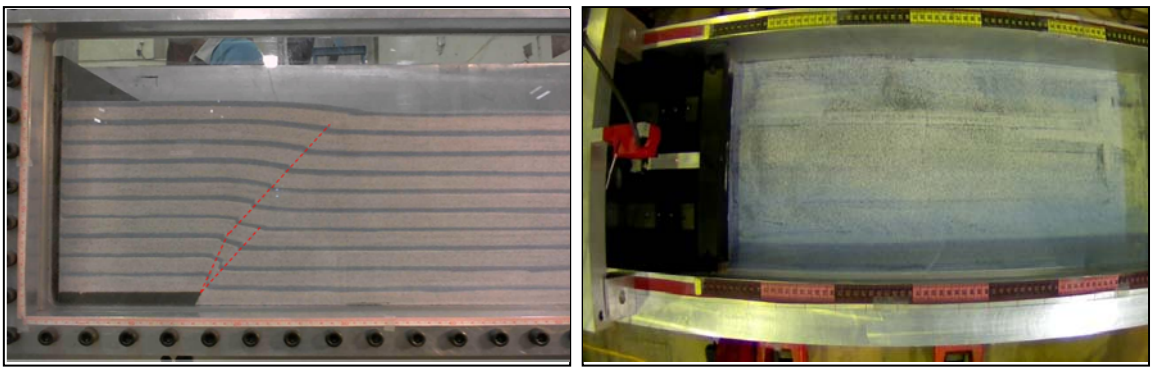
垂直抬升量　0.88 cm　　水平推移量　0.51 cm

(a)



垂直抬升量　1.16 cm　　水平推移量　0.67 cm

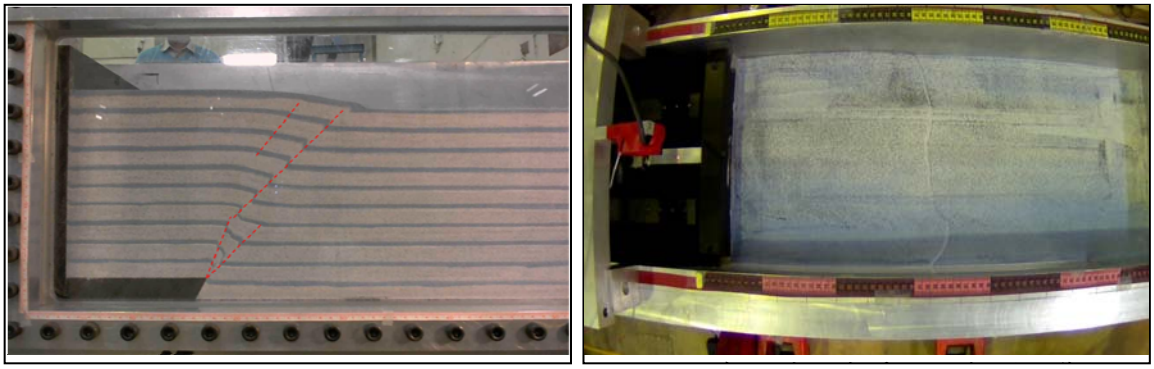
(b)



垂直抬升量　1.43 cm　　水平推移量　0.82 cm

(c)

圖 3-2-36 斷層錯動在不同錯動抬升量地層及地表的變位(1gRtest4)



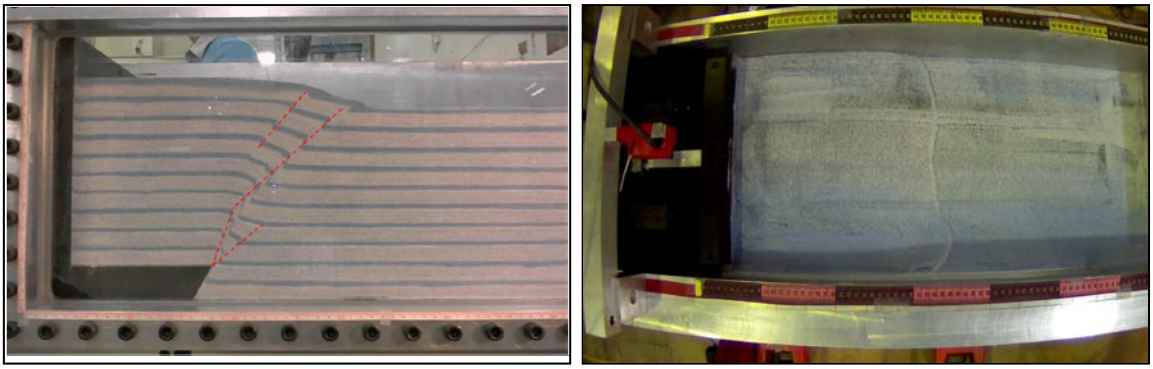
垂直抬升量　2.28 cm　　水平推移量　1.32 cm

(d)



垂直抬升量　2.96 cm　　水平推移量　1.71 cm

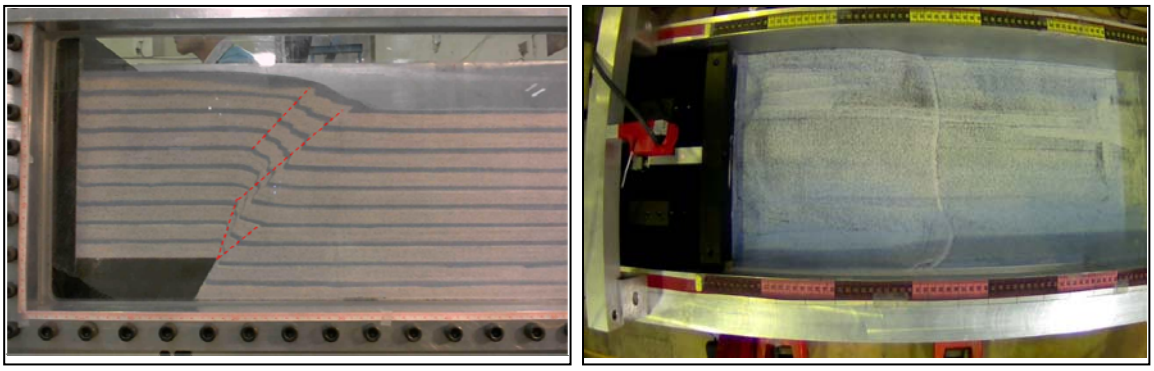
(e)



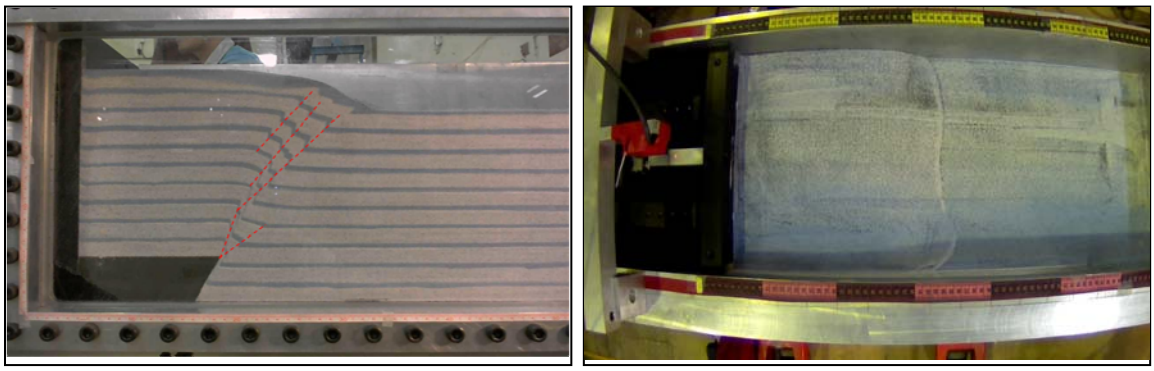
垂直抬升量　3.58 cm　　水平推移量　2.07 cm

(f)

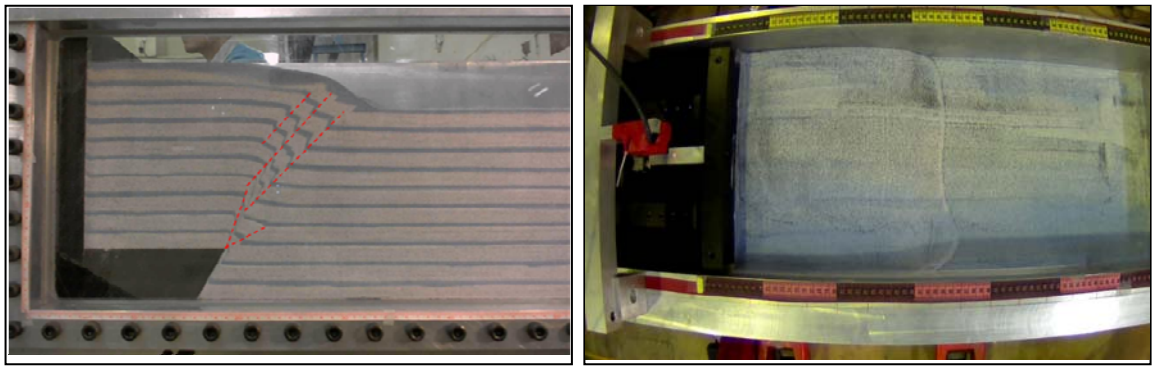
圖 3-2-36 斷層錯動在不同錯動抬升量地層及地表的變位(1gRtest4)(續)



垂直抬升量　4.54 cm　　水平推移量　2.62 cm
(g)



垂直抬升量　4.82 cm　　水平推移量　2.7.8 cm
(h)



垂直抬升量　5.49 cm　　水平推移量　3.17 cm
(i)

圖 3-2-36 斷層錯動在不同錯動抬升量地層及地表的變位(1gRtest4)(續)

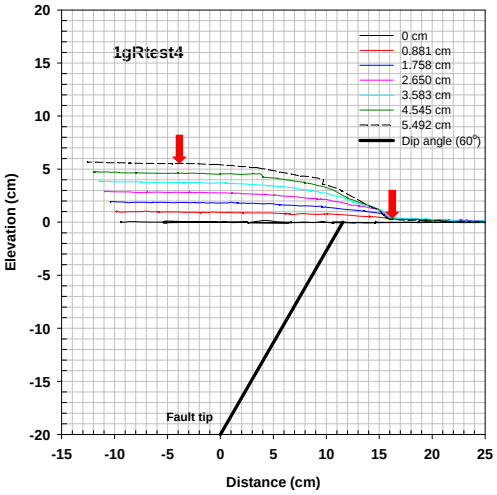


圖 3-2-37 不同斷層垂直錯動抬升量，地表的頂升曲線(1gRtest4)

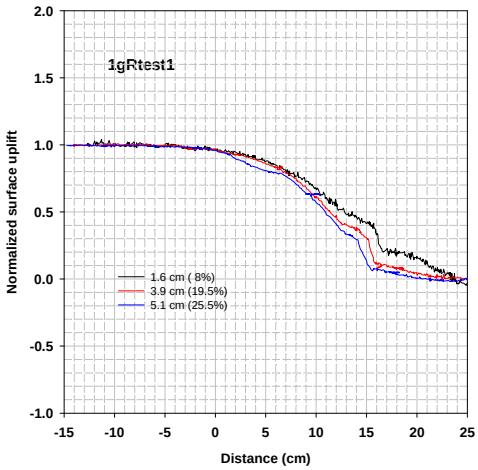


圖 3-2-38 不同斷層垂直錯動抬升量，地表的正規化頂升曲線(1gRtest1)

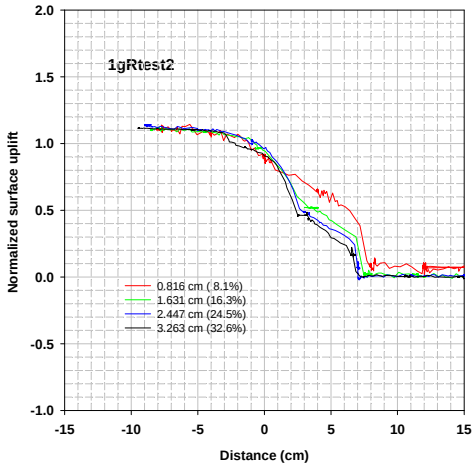


圖 3-2-39 不同斷層垂直錯動抬升量，地表的正規化頂升曲線(1gRtest2)

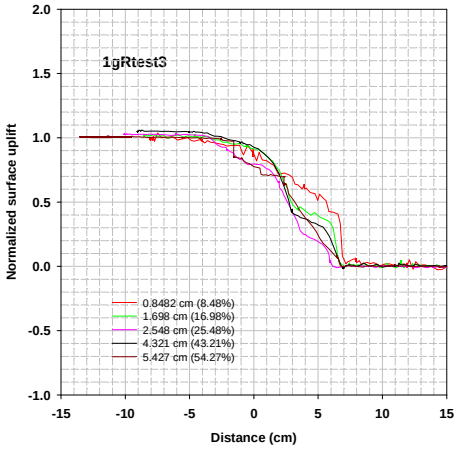


圖 3-2-40 不同斷層垂直錯動抬升量，地表的正規化頂升曲線(1gRtest3)

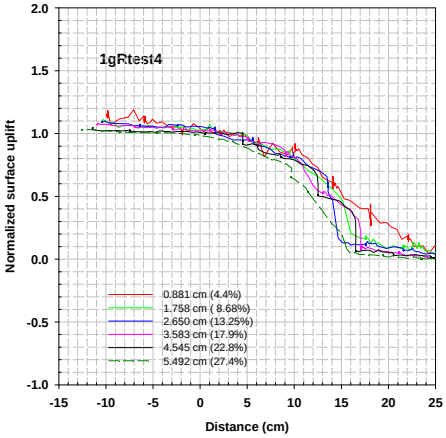


圖 3-2-41 不同斷層垂直錯動抬升量，地表的正規化頂升曲線(1gRtest4)

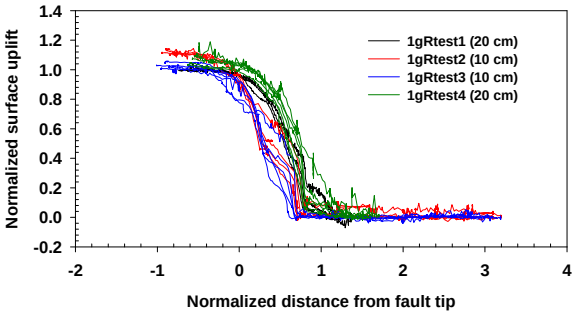


圖 3-2-42 地表正規化頂升量與正規化距斷層尖端出露距離的關係



圖 3-2-43 放置於離心掛台之斷層錯動模擬試驗箱-側視圖

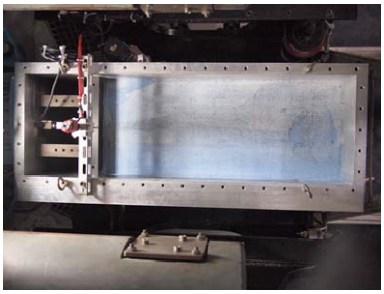


圖 3-2-44 放置於離心掛台之斷層錯動模擬試驗箱-頂視圖

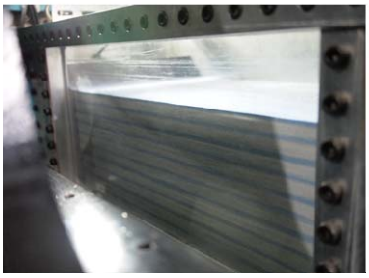


圖 3-2-45 斷層錯動模擬試驗箱側視圖



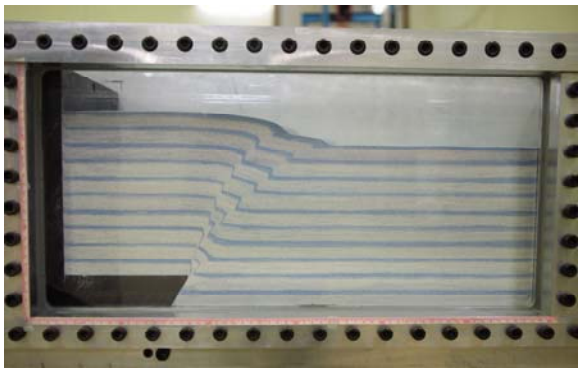
(a)

資料擷取系統及馬達控制系統



(b)離心機飛行控制系統

圖 3-2-46 斷層錯動模擬試驗試驗過程



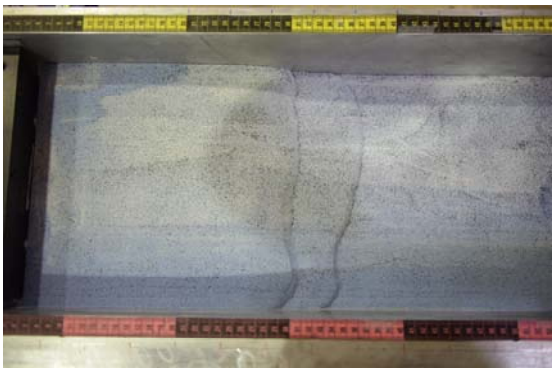


圖 3-2-48 頂升試驗完成試體側視及頂視圖(10gRest1)

垂直抬升量 3.51 cm 水平推移量 2.03 cm



圖 3-2-47 試驗箱吊離離心機坑

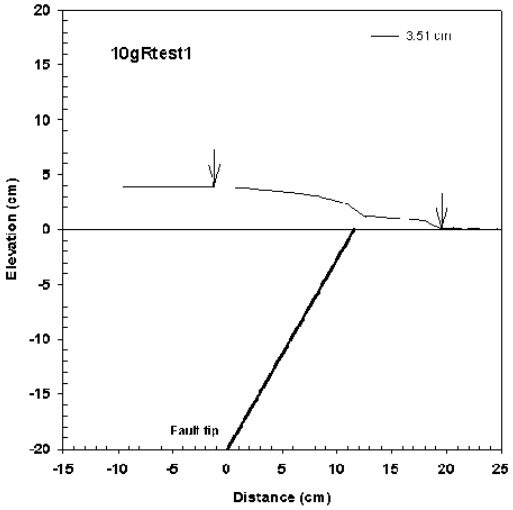


圖 3-2-49 斷層垂直錯動抬升量(3.51 cm)，地表的頂升曲線(10gRtest1)

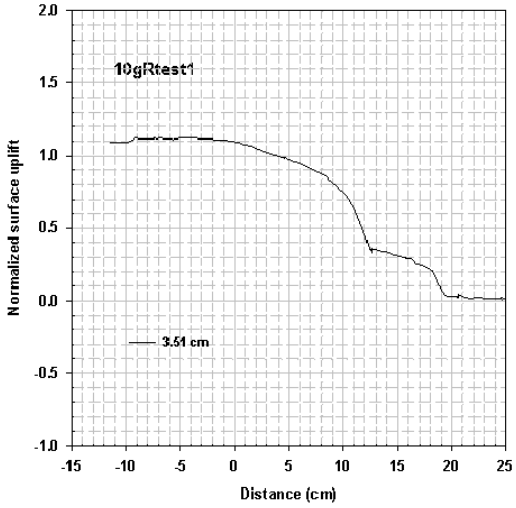


圖 3-2-50 斷層垂直錯動抬升量(3.51 cm)，地表的正規化頂升曲線(10gRtest1)

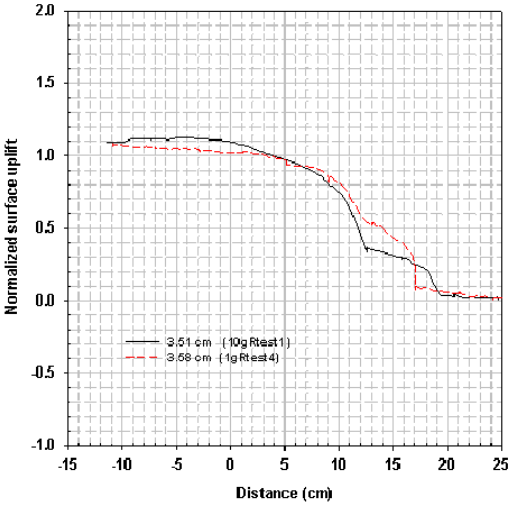


圖 3-2-51 斷層垂直錯動抬升量(3.51 cm)，1g 及 10g 試驗所得地表正規化頂升曲線的比較

3. 數值分析

本研究除了以物理模型進行試驗之外，尚規劃以數值方法為工具，分析物理模型無法處理之試驗項目。數值分析部分，包括以連續體模式進行有限差分法之分析，以及假設土層或岩層為顆粒組成，進行離散元素法(Discrete Element Method, DEM)之分析。相較於連續體模式，離散元素法處理顆粒與顆粒間之作用力，以及可能之鍵結強度，模擬顆粒群在邊界變形或外力作用下，隨時間變化對應之應力或應變之關係。另外，顆粒尺寸及數量左右模擬結果之準確性，但若要於模型中完全符合真實世界之顆粒組成狀況，則以現今電腦運算能力，尚不足以完整呈現真實之結果。在離散元素法模擬分析中，將視土壤或岩石狀況，把顆粒數及尺寸做適度的調整，使得模擬分析上得以有效率地完成，並在不損失太大模型分析結果精度上，進行參數敏感性分析。

分析模型模擬車籠埔斷層之竹山槽溝及中正公園槽溝，帶入槽溝土層特性以模擬斷層滑移時地表變形特徵，再以新城斷層(另一逆斷層)之土層特性參數驗證數值模型，以建立土層特性與地表變形型態之關係，目前地調所於中正公園及新城斷層皆以施作工程鑽井，但土層特性參數尚未取得，故以下成果尚為測試參數，仍可初步觀察地表變形範圍，待取得土層特性參數數值後，會修正並分析討論。

3-1. 邊界元素法(BEM)

以邊界元素法模擬簡化地層剖面之斷層擴展皺褶力學分析，初步分析成果說明如下：在模型中(圖 3-3-1)，斷層上的錯移量會由斷層面的底部，沿斷層面上，往地表面擴展，模擬地震破裂面擴展方式，進而造成地表面變形帶的產生。先前紀述的野外觀察，連同其它類似的地震變形帶之研究(如 Johnson 等人, 2002; Huang, 2006)，引領我們將近斷層的地表變形解釋為斷層錯動沿地震破裂面向地表擴展時，所造成的永久地表變形，底下將介紹本理論模型的原理、模擬結果及實例分析。

A. 模型的架構及原理—斷層錯動擴展模擬

根據地震學者的研究，地震的發生為斷層面上應力的釋放，這應力的釋放造成斷層兩側岩塊體的相對位移，通常斷層的錯移會開始於斷層面上的某一個位置，亦即所謂的震源，然後向外擴張，同時累積錯動量。然而就地表而言，這樣的擴張明顯地是由下向上，因為就會出現地表破裂跡的地震規模至少六級的地震，其震源深度通常會深於 5 公里。近年來許多的地震斷層深井鑽探，顯示斷層帶的厚度在一、兩公里的深度可小至僅數釐公尺寬，於這極小寬帶調適了地震的錯動量，相較於地表的變形帶，寬度則由幾公尺到幾百公尺皆有可能，顯明可見，地底深處與地表面上或淺部迥異的條件，反應在斷層錯動對圍岩的變形上。我們的模型將僅對地表淺部的變形做探究。

圖 3-3-1 中之模型為一斷層先行存在於半空間(half-space)的介質(medium)裡，此斷層面上的錯移量，會由斷層面的底部，沿斷層面往地表面擴展，如同圖 3-3-1 垂直剖面圖所示。地表變形帶的產生，即為斷層錯移造成地表面形變，其應變量在某處開始超出地表物質的強度而造成永久變形，隨斷層錯移前緣往上擴展的過程中，這永久變形的範圍也會隨之擴大。模型中斷層的幾何形態，可視實際的狀況作調整，不用拘束於平面斷層或特定斷層傾角，且各類的斷層皆可做模擬。

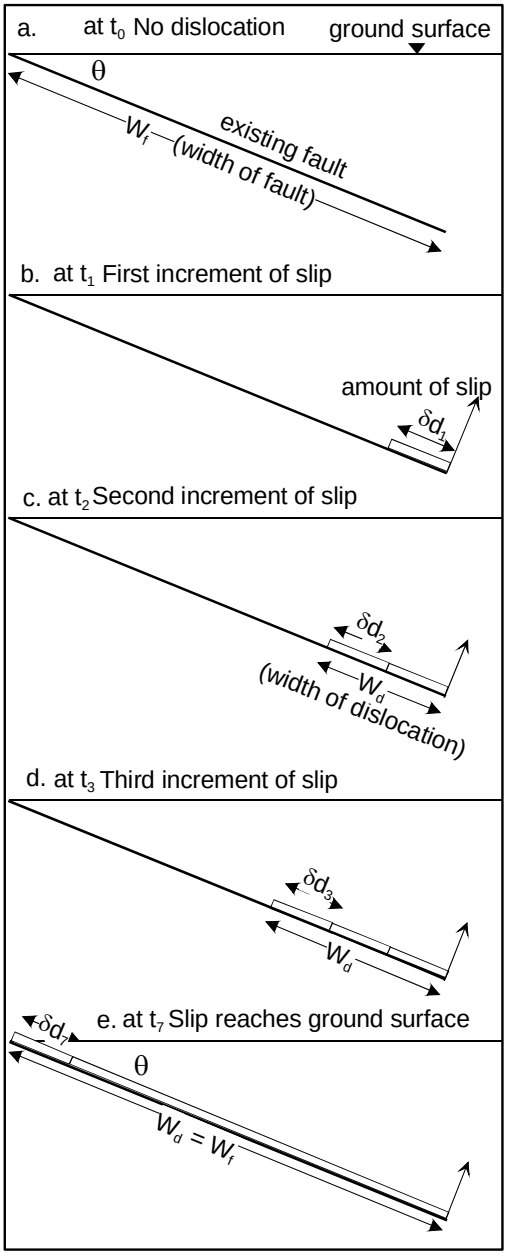


圖 3-3-1 斷層錯動擴展的模擬示意。ti 代表不同的時間點，θ 為斷層的傾角，Wf 為斷層的總長，δdi 為每個時間段斷層錯動的寬度，Wd 為累加擴展長度。

A-1. 組成律—彈塑性模型

本模型以簡單的均質等向性的介質著手，對地表永久變形的模擬，採用彈塑性的組成律，視地表物質受力在達屈服點(yielding point) 前，變形行為為線彈性(linear elastic)，即在彈性的範疇內偏差剪應力$\sigma_{x'y}$與偏差剪應變$\varepsilon_{x'y}$的關係在一維形式上為線

性，達屈服點(yielding point)之後為理想塑性，粗略地說，即應力維持不變，但應變無限制地增大。圖 3-3-2 為本模型實際所採用的組成律之應力應變第二不變量的關係。

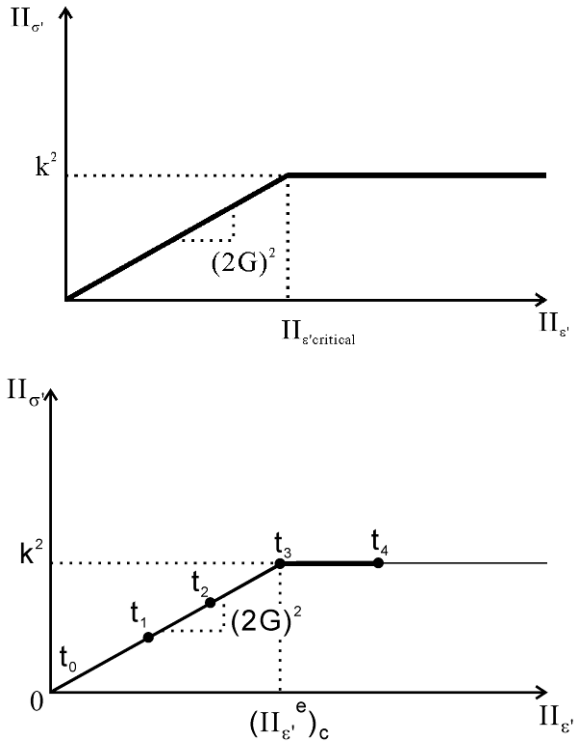


圖 3-3-2 彈塑性物質在持續加載(loading)下的變形路徑。

其呈現 $II_{\sigma'}$ 偏差應力的第二不變量(second invariant of deviatoric stress)與 $II_{\varepsilon'}$偏差應變第二不變量(second invariant of deviatoric strain)的關係。這關係在該物質屈伏(yielding)前，即 $II_{\varepsilon'}=k^2$，斜率與兩倍的剪力係數 G 的平方成正比。k 為屈服強度。屈服後，$II_{\sigma'}$維持等於 k^2，但 $II_{\varepsilon'}$持續增加，這包括彈性應變及塑性應變。t_i 為模擬時的時間點，k 為屈伏強度，上標 e 為代表彈性，下標 c 代表屈服關鍵點。

對一彈性物質而言其應力應變的關係為

$$\varepsilon_{ij}^{e} = \frac{1}{2G}\,\sigma_{ij} + \frac{-\nu}{E}\,\sigma_{kk}\,\delta_{ij} \tag{3-1}$$

$$\varepsilon_{kk}^{e} = \frac{1-2\nu}{E}\,\sigma_{kk} \tag{3-2}$$

其偏差應力與偏差應變則為

$$2G\varepsilon'^{e}_{ij} = \sigma'_{ij} \tag{3-3}$$

G、*E* 及 ν 分別為剪力係數、楊氏係數及泊松比。上標 e 指示於彈性範疇內。

偏差應力的第二不變量為

$$II_{\sigma'} = \left(\frac{1}{2}\right) \sigma'_{ij}\, \sigma'_{ij} \tag{3-4}$$

偏差應力為

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma\delta_{ij} \tag{3-5}$$

$$\sigma = \left(\frac{1}{3}\right) \sigma_{\kappa\kappa} \tag{3-6}$$

此外，偏差應變的第二不變量為

$$II_{\varepsilon'}{}^{e} = \left(\frac{1}{2}\right)\ \varepsilon'^{e}_{ij}\varepsilon'^{e}_{ij} \tag{3-7}$$

$$\varepsilon'_{ij} = \varepsilon_{ij} - \varepsilon\delta_{ij} \tag{3-8}$$

$$\varepsilon = \left(\frac{1}{3}\right) \varepsilon_{\kappa\kappa} \tag{3-9}$$

因此，由方程式(3-7)、(3-8)及(3-9)，在圖二中偏差應力的第二不變量與偏差應變的第二不變量的線性部份的關係為

$$II_{\sigma'} = (2G)^2 II_{\varepsilon'}{}^{e} \tag{3-10}$$

接下來，將以上述的這些變數來說明再對這彈塑性物質持續加載(且不可逆)，所將發展的變化。

A-2. 達屈伏的關鍵條件

根據Levy-Mises對三維的屈伏方程式，在該物質屈伏(yielding)前，亦偏差應力的第二不變量 $II_{\sigma'}$以與偏差應變第二不變量 $II_{\varepsilon'}$以兩倍的剪力係數 G 的平方的關係成線性增加。我們即利用這樣的關係式去計算第二不變量，直到偏差應力的第二不變量 $II_{\sigma'}$ 以達到其關鍵值，這屈伏條件為(即圖 3-3-2 上時間點 t_3 的位置)：

$$(II_{\sigma'})_c = k^2 \tag{3-11}$$

k 為屈伏強度(yield limit)。

在該物質屈伏的開端，其關鍵偏差應力的第二不變量$(II_{\sigma'})_c$ 相對等的偏差應力的第二不變量為

$$(II_{\varepsilon'}{}^e)_c = \left(\frac{k}{2G}\right)^2 \tag{3-12}$$

在模擬斷層面上的錯移量，由其底部沿斷層面往地表面擴展的現象，我們逐次的加入具等量錯位的擬小斷層，並利用錯位理論(dislocation theory)所提供的位移場的函數解來計算各階段在地表面上所造成的應變，錯位理論的位移場的函數解可參考Okada(1985，1992)，必須提及地是我們自始至終我們的參考狀態(reference state)皆相同。

A-3. 基本的假設：塑性應變可藉由錯位理論(dislocation theory)求得

地表面上的任一點的應變可藉由彈性錯位理論解計算求得為在我們分析中的一個基本假設，而方程式(3-12)可用來做為是否開始塑性流動(plastic flow)的判定準則。一旦塑性流動開始，我們利用 Prandtl-Reuss 彈塑性方程式來計算應變並分離出彈性應變及塑性應變。Prandtl-Reuss 方程式為 Levy-Mises 方程式對理想塑性體的概括(Malvern,

1969, p338-340)。如此，當地表上的某一點達屈伏條件，新增的具等量錯位擬小斷層將對該地表面產生一小額增量的偏差塑性應變

$$d\varepsilon'^{p}_{ij} = \sigma'_{ij} \sqrt{\frac{II^{p}_{d\varepsilon'}}{(II_{\sigma'})_c}} \ , \tag{3-13}$$

及小額增量的彈性應變

$$d\varepsilon^{\varepsilon}_{ij} = \frac{1+\nu}{E} d\sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} d\sigma_{kk}\,\delta_{ij} \tag{3-14}$$

因此，地表上由等量錯位擬小斷層所產生的小額增量的應變即為由方程式(3-13)及(3-14)所提供的彈性應變及塑性應變的總和

$$d\varepsilon^{\delta}_{ij} = d\varepsilon^{\varepsilon}_{\iota\varphi} + d\varepsilon^{p}_{ij} \tag{3-15}$$

方程式(3-13)中的塑性應變即是我們用來關聯地震變形帶的形成。如此一來，我們在計算的過程中必要把彈性應變及塑性應變分離開，這樣才能算出變形帶中的塑性應變的量。欲了解應變如何分離的關鍵即要能理解方程式(3-13)中由等量錯位擬小斷層(dislocation)所產生的應變可改寫為

$$d\varepsilon^{\delta}_{ij} = d\varepsilon^{\delta}\delta_{ij} + d\varepsilon'^{d}_{ij} \tag{3-16}$$

亦即為平均應變及偏差應變的和。ε為平均正向應變，方程式(3-9)有其定義。這平均正向應變則全屬彈性，而偏差應變則全為塑性

$$d\varepsilon^{\delta}_{ij} = d\varepsilon^{\varepsilon}\delta_{ij} + d\varepsilon'^{p}_{ij} \tag{3-17}$$

方程式(3-17)就是我們運作上分離彈性與塑性應變及求得它們的量之依據。

A-4. 達屈伏點後無卸載(no unloading)

當 Levy-Mises 物質受載荷(loading)時，其變形的增量功(increment of work)

$$dW = \sigma_{ij}' \, d\varepsilon_{ij} = \sigma_{ij}'(d\varepsilon_{ij}^{e} + d\varepsilon_{ij}^{p}) \tag{3-18}$$

為正；反之，卸載(unloading)時，增量功 dW 則為負的。當分析的過程裡當物質達屈伏點後，每階段的增量功將被持續追蹤。

$$dW = dW^{d} = \sigma_{ij}' \, d\varepsilon^{d}_{ij} > 0 \tag{3-19}$$

然而，我們假定達屈伏點後，沒有卸載(unloading)。因此，當 $dW^{d} < 0$ 時，我們將增量應變 $d\varepsilon^{d}_{ij}$ 忽略。

B. 永久變形帶及其應變形式的模擬結果

B-1. 逆斷層及走向滑移斷層

圖 3-3-3 是利用上述的理論模型模擬斷層錯動對地表物質所造成的變形。左右兩圖分別為走向滑移斷層及逆斷層，兩斷層的傾角皆為 30°。兩模型在地表的邊界條件皆相同，因此變形結果的差異將可歸咎於斷層種類的不同，亦即斷層錯動方式上的不同。圖 3-3-3a~d 為不同的階段，分別將地表面的變形情況放置在上，其下則為該階段斷層錯動擴展進行的垂直剖面示意圖。錯動由斷層底部沿其面上往地表面擴展，即垂直剖面圖中以灰色矩形示意的錯位(dislocation)，其寬 W_d 逐步往斷層的頂端增長直到達地表面，亦即 W_d=W_f 斷層的寬度。在這過程中地表的彈性應變的大小隨錯位的擴展而變大，甚至大到造成地表物質屈伏產生塑性變形，形成不可逆轉的永久變形，而這永久變形帶也隨之變寬。

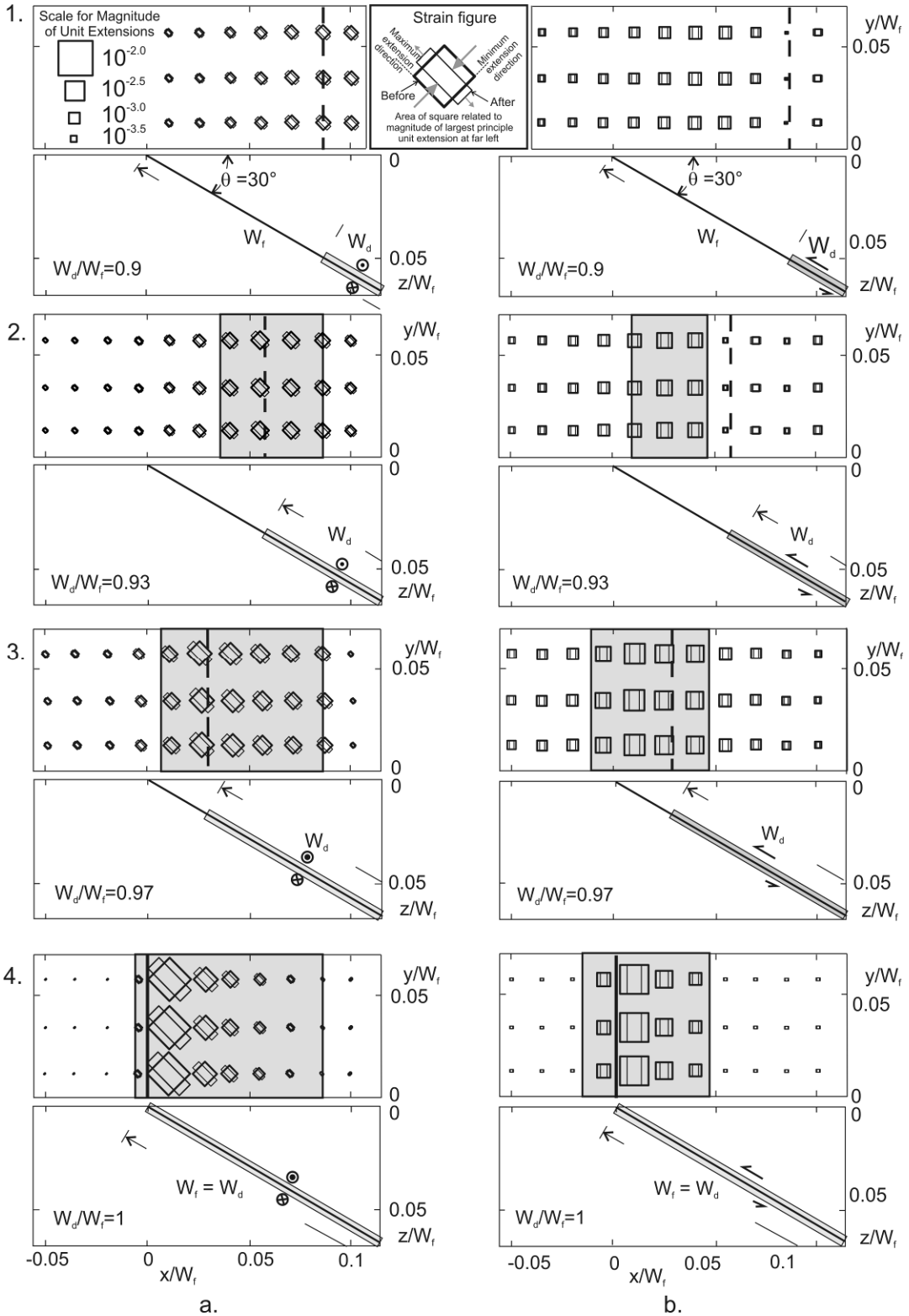


圖 3-3-3 永久變形帶如何在地表演化形成的過程。左欄中的斷層為傾角 30 度的右移斷層，右圖為為傾角 30 度的逆斷層。

B.2 傾角的效應

接下來我們將檢示斷層傾角不同對永久變形帶之影響。首先將介紹兩個呈現變形帶的特徵變數 w/S 及 w_{HW}/w_{FW}，其中 w、S、w_{HW} 及 w_{FW} 分別為變形帶的寬度、斷層錯動量、變形帶於斷層上盤的寬度及下盤的寬度。我們所比較的仍以走移斷層及逆斷層為例，各模型中斷層的傾角分別為 30°、60°及 90°，模擬的結果分別為圖 3-3-4a~c。

於圖 3-3-4a 對這兩類的斷層在傾角為 30°的條件，斷層跡的位置明顯地靠近永久變形帶的一側，而遠離另一側，將變形帶分割成寬度懸殊的兩部份，斷層面傾向於較寬的部份，換言之，永久變形帶在斷層上盤的寬度明顯大於下盤的寬度；亦即 $w_{HW}/w_{FW}>1$。

垂直斷層面的兩類斷層的模擬結果有兩特點明顯可見：永久變形帶中的應變形式迥異，走向滑移斷層其斷層跡兩側對稱，逆斷層則為反對稱(antisymmetric)，即一側(下盤)為壓應變為主，另一側(上盤)為張應變。再者，斷層跡的位置在永久變形帶的中間。

斷層傾角為60°的模擬結果，不難理解地其現象上即介於傾角為 30°和90°的過渡之間，就斷層種類的不同上的比較，60°的走向滑移斷層的模擬結果較似30°的走向滑移斷層，永久變形帶在斷層上下盤的寬度差明顯不同；60°的逆斷層的模擬結果較似90°的逆斷層，永久變形帶在斷層上下盤的寬度差不明顯。兩類斷層的模擬結果的相同處，即斷層上盤的應變與相對等的下盤位置的應變在大小相較明顯大許多。

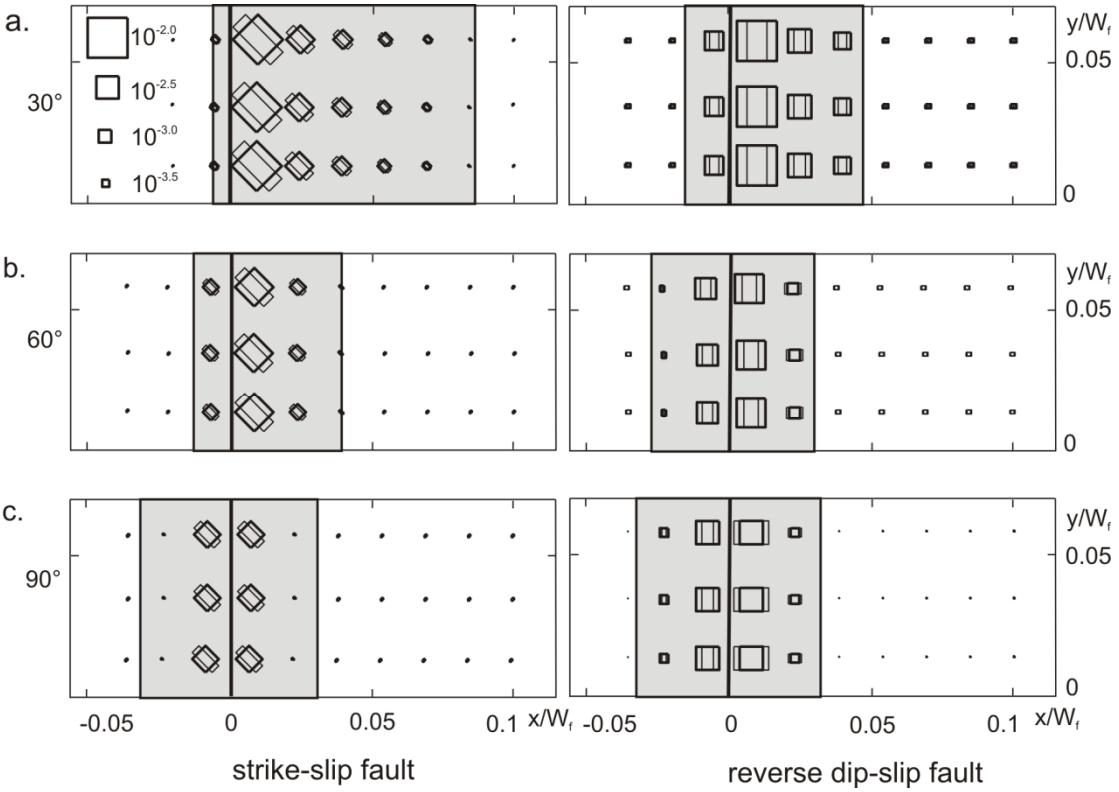


圖 3-3-4 理想永久變形帶，左欄為走向滑移斷層，右欄為逆斷層，斷層傾向右側或呈垂直。(a)斷層角度為 30˚ (b)斷層角度為 60˚ (c)斷層角度為 90˚。

B-2. 圖表化取決特徵參數

我們整合了三個圖表以便於評估變形帶的一些參數。這些圖表皆以無因次參數(dimensionless parameters)呈現。我們選擇的斷層的錯動量 S 來正規化(normailze)長度相關的參數，因為相較上錯動量較易評估。這些無因次參數包括斷層寬度對錯動量的比率 W_f/S，斷層的角度 θ(度)及偏差應變第二不變量$(II_{\varepsilon'}^{e})_c$。其它可由數值解求得的無因次變數(variable)有變形帶在上下盤的寬度比 w_{HW}/w_{FW} 及變形帶寬度 w=w_{HW}/w_{FW} 對錯動量的比 w/S。這些無因次參數及變數的相互關係呈現在圖 3-3-5 中。

變形帶在上下盤的寬度比 w_{HW}/w_{FW} 特別有用，因為它跟斷層的角度有很好的關連性。圖 3-3-5a 中的兩條曲線分別為逆斷層與走向滑移斷層，其變形帶在上下盤的寬度比值對斷層傾角的關係。經過我們的檢合於相當範圍的偏差應變第二不變量$(II_{\varepsilon'}^{e})_c$值，所得的結果皆幾乎與這兩曲線吻合。亦即變形帶在上下盤的寬度比 w_{HW}/w_{FW} 僅與

斷層傾角及種類有關。

圖 3-3-5b 及 c 分別為走向滑移斷層及逆斷層在不同傾角時，斷層寬度對錯動量的比率 W_f/S 與關鍵偏差應變第二不變量$(II_{\varepsilon'}^{e})_c$ 的關係曲線，然而偏差應變第二不變量$(II_{\varepsilon'}^{e})_c$ 的值是以其指數形式(exponential form)n 來表示，即$(II_{\varepsilon'}^{e})_c=10^n$。

因此，調查者在量測得知上下盤的寬度比 w_{HW}/w_{FW} 後，可根據圖 3-3-5a 決定斷層的傾角，然後再利用圖 3-3-5b 對走向滑移斷層，利用圖 3-3-5c 對逆斷層，視斷層寬度對錯動量的比值 W_f/S 與偏差應變第二不變量$(II_{\varepsilon'}^{e})_c$ 那一變數值已知的情況下，去評估另一個變數的值。

圖 3-3-5 中的結果皆是用斷層寬度對錯動量的比為 3333 所求得的，這結果應不至於影響到分析的結果，因為通常會造成永久變形帶的地震斷層，其斷層在傾角方向的寬通常不會太窄，且由圖 3-3-3 中可知永久變形帶要等到錯位(dislocation) Wd 接近往斷層的頂端，即近地表面時，才開始形成。

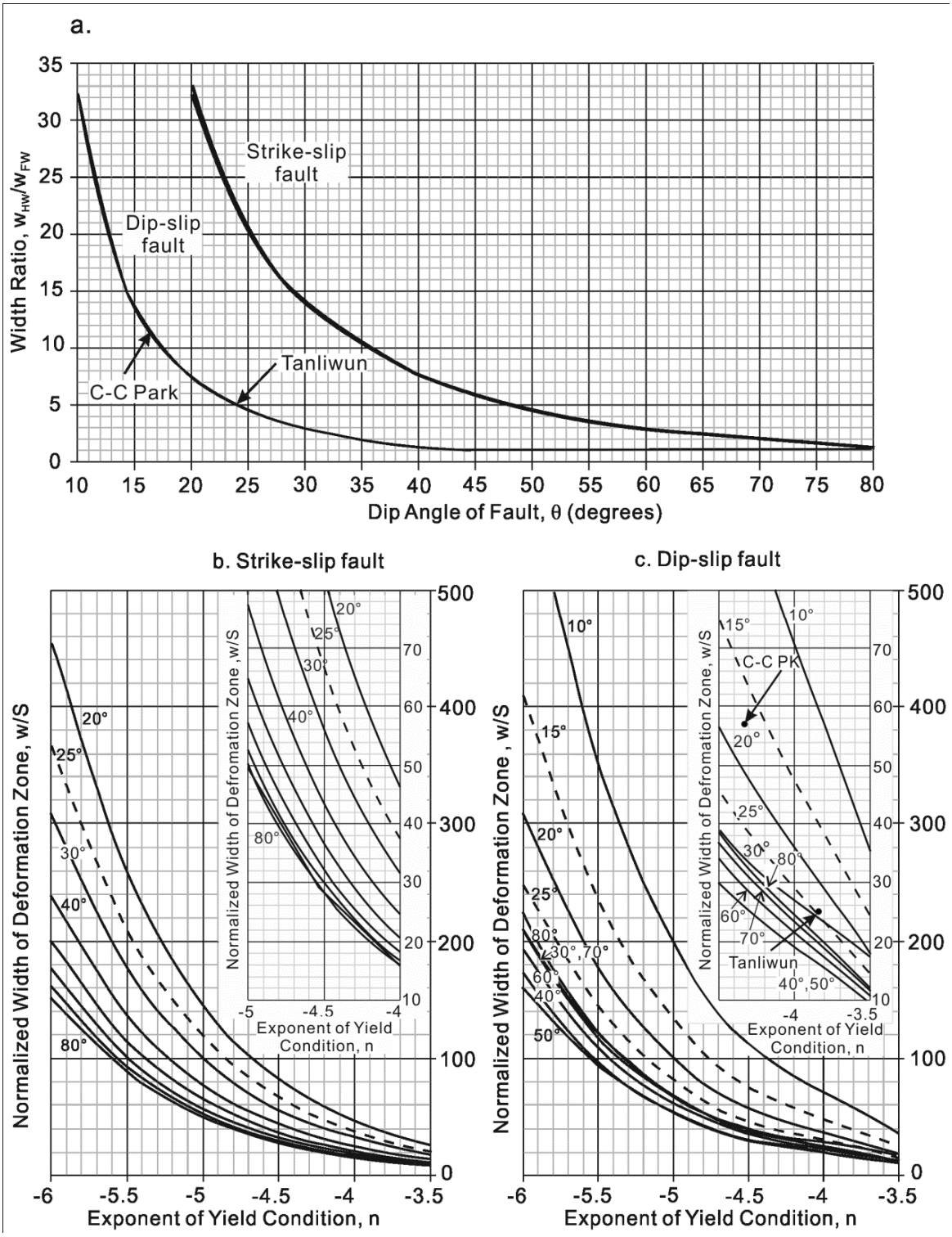


圖 3-3-5 永久變形帶的參數間的關係。C-C Park 為豐原中正公園的地表變形，Tanliwun 為竹山他里溫地表變形，Hsincheng 為新城斷層可能的地表變形。傾向滑移斷層(dip-slip fault)即泛指逆斷層及正斷層 。(a) 變形帶在上下盤的寬度比 w_{HW}/w_{FW} 與斷層的角度

θ(度)及斷層種類的關係。(b)走向滑移斷層其斷層寬度對錯動量的比值 W_f/S 與關鍵偏差應變第二不變量$(II_{\varepsilon'}^{e})_c$ 的關係。(c)傾向滑移斷層其斷層寬度對錯動量的比值 W_f/S 與關鍵偏差應變第二不變量$(II_{\varepsilon'}^{e})_c$ 的關係。

C. 實例分析

C-1. 豐原中正公園的地表變形

我們將中正公園底下的斷層作用視是為單純的逆斷層作用，來進一步分析其地表的變形。在這變形帶中出現的小尺度的高角度逆斷層、低振幅的褶皺及裂縫皆指示最大壓應力的方向與集集地震斷層跡的大致上的伸向呈垂直。此外，GPS 的資料也指示水平位移的方向也與斷層跡的大致上的伸向呈垂直。儘管，這變形帶可能不是單純的逆斷塊的前緣變形，不過由於西側面西的地震引致地形崖遠大東側面東的地震引致地形崖，因此我們認定概略上仍可視之為單純的逆斷塊的前緣變形。

集集地震斷層的幾何參數，根據 Kao 及 Chen(2000)：斷層的長度為 80 公里，斷層的寬度為 30 公里，斷層的傾角為 20˚~30˚E，此變形帶就斷層地表跡而言為高度不對稱，w_{HW}/w_{FW}=11.5，變形帶寬為 350 公尺，其在斷層跡西側的寬度 6 公尺為我們最佳的評估。所有的參數彙整於表 3-3-1。

由表 3-3-1 可曉得我們視斷層的傾角θ及關鍵偏差應變第二不變量$(II_{\varepsilon'}^{e})_c$ 為未知數，利用圖 3-3-5a 找出與 w_{HW}/w_{FW}=11.5 相搭配的角度為 16.5˚，再利用圖 3-3-5c 或圖 3-3-6 找出在斷層角度 16.5˚時，與 w/S 為 57 相搭配的關鍵偏差應變第二不變量$(II_{\varepsilon'}^{e})_c$ 值的指數 n 來，此值為-4.3，即$(II_{\varepsilon'}^{e})_c=10^{-4.3}=0.5\times10^{-4}$。這兩未知參數經分析後，所得的值其合理性尚可，詳細的討論可參及 Huang 及 Johnson(2010)。最後，我們將變形帶內的變形量與斷層跡的位置關係呈現在圖 3-3-7，以供人造建物安全設計時參考。

表 3-3-1 豐原中正公園的地表變形之參數值

參數 [單位]	測量值	設定值	變化值	計算值
W_f, 斷層寬度[公尺]		Yes, $30x10^{3}$[a]		
w, 變形帶寬度 [公尺]	350[b]			346
S, 斷層錯動量[d] [m]	VS: 4.5 to 5[b]; RDS:6[c]	Yes, 6		
$\frac{W_{HW}}{W_{FW}}$, 寬度比	11.5[b]			
θ,斷層角度 [°]	20 to 30 E[a]		Yes	16.5 E
$\frac{W}{S}$, 正規化的變形帶寬				57
n, 關鍵偏差應變第二不變量值的指數 (10^n)			Yes	-4.3

[a]*Kao* 及*Chen* [2000].

[b]*Huang* [2006].

[c]*Chen* [2002]; 註記: 斷層錯動量的推估為根據在中正公園西南方的開挖槽溝中的剪切帶的錯移量。

[d]VS為垂直的錯動量; RDS is逆移的錯動量

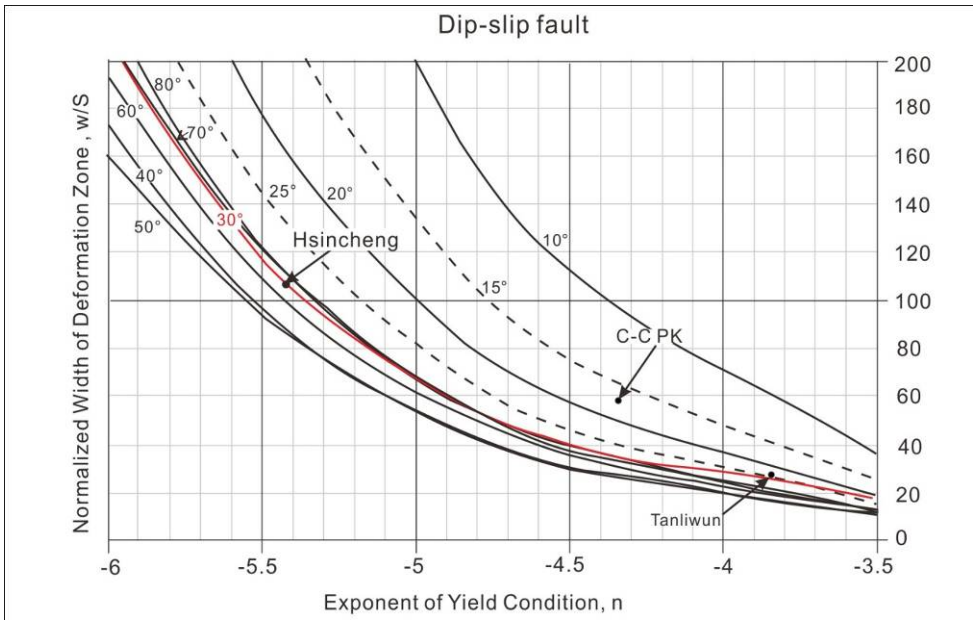


圖 3-3-6 傾向滑移斷層其斷層寬度對錯動量的比值 Wf/S 與關鍵偏差應變第二不變量 (II'e)c 的關係。C-C Park 為豐原中正公園的地表變形，Tanliwun 為竹山他里溫地表變形，Hsincheng 為新城斷層可能的地表變形。圖中紅色實線為斷層角度為 30 度，顏色與其它曲線不同，僅為與鄰臨的曲線區別，並無特別意義。

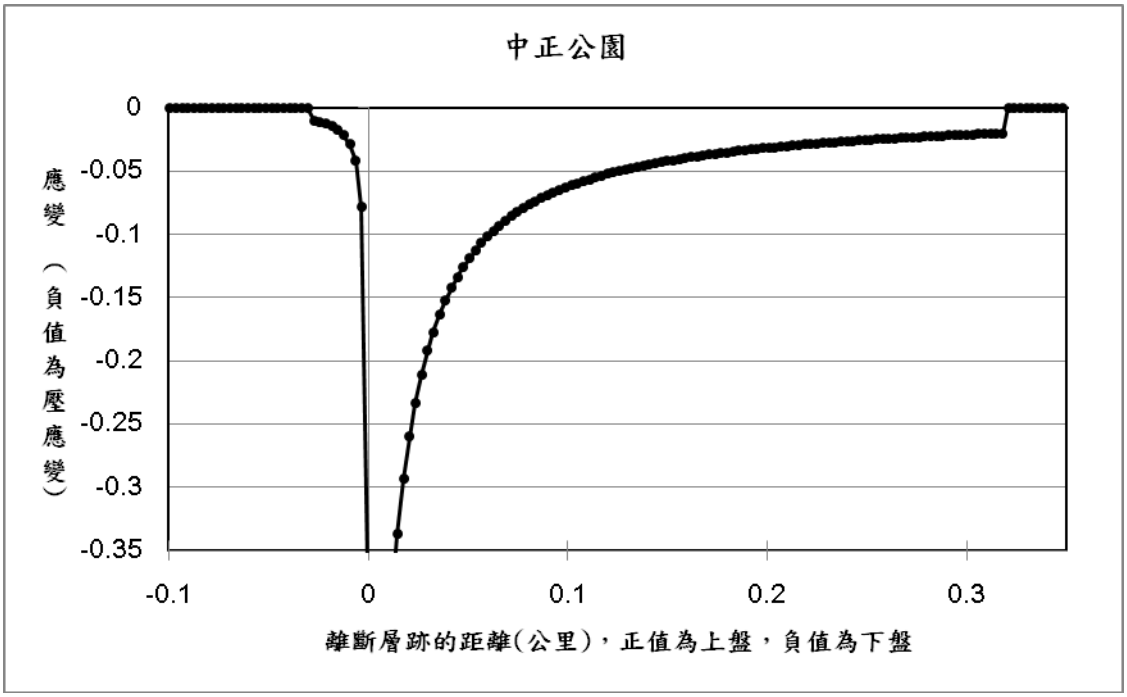


圖 3-3-7 中正公園變形帶中應變與離斷層跡相對位置的關係圖。◆為實際由數值模型所得的值。為避免數值運算上所造成的問題，鄰近斷層跡兩側的應變量並未表示，但可知離斷層跡越近應變量越大。

C-2. 竹山他里溫地表變形

竹山他里溫地表變形帶相較不尋常，因為斷層的角度已經由鑽井得知的斷層深度及井孔離斷層跡的水平距離，兩者的幾何關係上求得，其角度為 24°，利用圖 3-3-5a 我們可以找出相對應的 w_{HW}/w_{FW}=5，這與野外調查所認定的在上盤的變形帶相對下盤較寬，合理可接受，所有的參數彙整於表 3-3-2。判定的變形帶寬度約在 50 到 100 公尺間變化，由竹山槽溝的淺部斷層錯動量及同震位移反演推估的深部錯動量皆約為 3 公尺，我們進一步取變形帶的平均寬度為 72 到 78 公尺，因此 w/S 的值為界於 24 到 26 之間，在利用圖 3-3-5c 中的曲線由已知斷層為 24°，我們將可得找出相對應的的關鍵偏差應變第二不變量$(II_{\varepsilon'}^{e})_c$值的指數 n 為-3.8 到-3.9，亦即 $1.3\times10^{-4}=10^{-3.8}\leqq (II_{\varepsilon'}^{e})_c\leqq 10^{-3.9}=1.6\times10^{-4}$，這值的合理性之討論可參及 Huang 及 Johnson(2010)。最後，我們將變形帶內變形量與斷層跡的位置關係呈現在圖 3-3-8，以供人造建物安全設計時參考。

表 3-3-2 竹山他里溫地表變形之參數值

參數 [單位]	測量值	設定值	變化值	計算值
W_f, 斷層寬度[公尺]		Yes, $30x10^{3a}$		
$\frac{W_{HW}}{W_{FW}}$, 寬度比	large[b]			5
θ, 斷層角度 [°]	20 E to 30 E[a], 24 E[b, c]	Yes, 24 E		
w, 變形帶寬度 [公尺]	50 to 100[b]			72 to 78
S, 斷層錯動量[d] [m]	3[b, d]	Yes, 3		
$\frac{w}{S}$, 正規化的變形帶寬				24 to 26
n, 關鍵偏差應變第二不變量值的指數 (10^n)[]			Yes	-3.8 to -3.9

[a]*Kao及Chen* [2000].
[b]*Huang* [2006].
[c]*Chen et al.* [2007].
[d]*Johnson et al.* [2001].

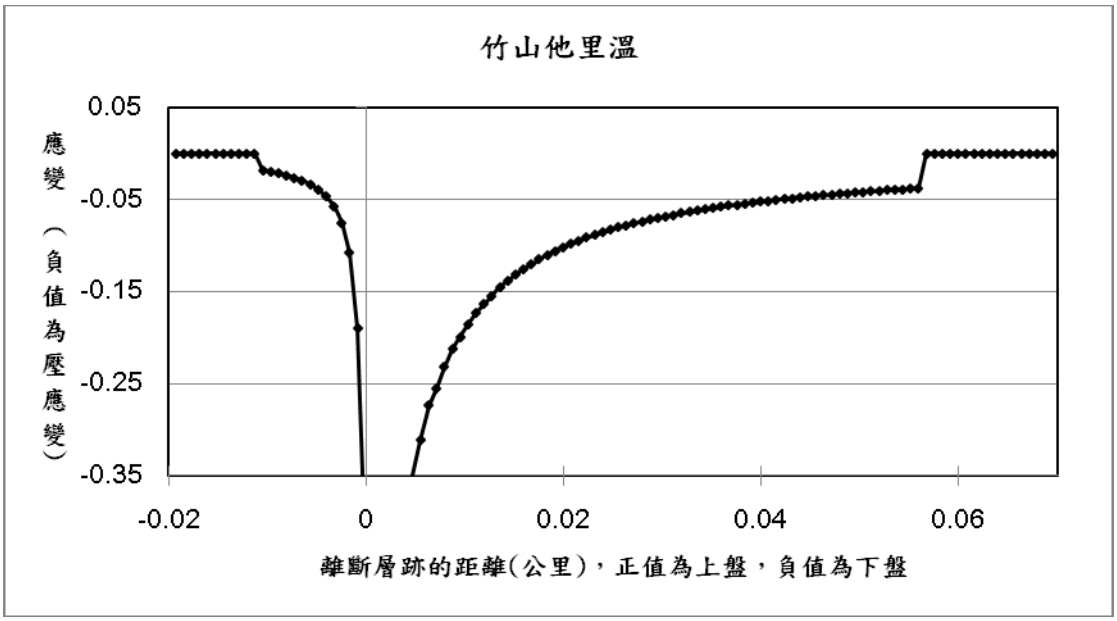


圖 3-3-8 竹山他里溫變形帶中應變與離斷層跡相對位置的關係圖。◆為實際由數值模型所得的值。為避免數值運算上所造成的問題，鄰近斷層跡兩側的應變量並未表示，但可知離斷層跡越近應變量越大。

C-3. 新城斷層

在前兩個分析的例子中，有九二一地震後的現地調查所得知的地表變形帶之幾何

特徵，這包括變形帶的總寬度及其寬度在上下盤所占的比例。接下來的這個例子我們並沒有地震後的現地調查資料，因此底下的分析，我們將在盡可能客觀的情況下，研判當新城斷層再錯動可能造成的地表變形帶之幾何特徵。首先，我們將簡單的敘述新城斷層的性質，然後討論如何選取模型所需參數的值，最後呈現模型所得的地表變形帶之幾何特徵及應變量。

新城斷層為逆移斷層，總長約為 28 公里，地表的斷層跡呈弧形，凹口向東南，依地質特性分為 2 段：北段呈東北東走向，由新竹縣關西南方約 1.5 公里處向西延伸至芎林鄉頭前溪，長約 12 公里；南段呈東北走向，承續北段由新竹縣竹東鎮頭前溪附近向西南延伸至苗栗縣頭份東北方，長約 16 公里（Tang, 1968；塗明寬與陳文政，1990；張徽正等，1998；林啟文等，2005, 2007)。

我們模型所需的參數有: 斷層寬度(W_f)、 斷層角度(θ)、 斷層錯動量(S)及關鍵偏差應變第二不變量值的指數(n)。根據 Wells 和 Coppersmith (1994)的經驗公式，列舉地震規模(M_w)與我們所需的斷層參數如下:

$M_w = 5.08 + 1.16 \log(SRL)$　　*SRL*: 為地表破裂長度(單位公里)

$M_w = 4.06 + 2.25\log(WID)$　　*WID*: 為地下破裂寬度(單位公里)

其中地表破裂長度(*SRL*)已知為 28 公里，因此可推得地下破裂寬度(*WID*)為 15.8 公里。斷層角度因各研究的調查位置及方法的不同，明顯有很大的差異，變化的範圍為 20~60 度（表 3-1-3 新城斷層過去文獻），若去除掉地表淺部斷層角度的變異，大部份的調查結果傾向斷層角度為介於 30~40 度之間。斷層錯動量再以 Wells 和 Coppersmith (1994)的經驗公式來評估，取最大位移與地震規模(M_w)的關係:

$M_w = 6.69 + 0.74 \log(MD)$　*MD*: 為最大位移(單位公尺)

可推得最大地表位移量約為 1.24 公尺，假定此值相當於斷層錯動量(*S*)。再者，關鍵偏差應變第二不變量值的指數(n)的值較難評估，我們將該參數視為變數。再根據林啟文等人(2007)在頭前溪距中正大橋西側約 400 公尺河床的斷層帶露頭調查，上盤的斷層破損帶(damaged zone)約為 100 公尺，這也相當於石瑞銓等人(2003)淺層反射震測啟寶測線(02P-HCG-SC-BS-1)所得的結果，亦即上盤的破碎帶約有 100 公尺寬，因此我們假定上盤的變形帶(w_{HW})為 100 公尺寬。此外，所有的調查中皆未對下盤的破損帶或破碎帶有所提及，可能暗示下盤的變形相較不明顯或相較窄了許多，這在我們的理論模

型中斷層需為相對較小的角度，因此我們採用先前提及的大部份調查結果的範圍之下限，亦即假定斷層角度為 30 度。

相關的參數值彙整於表 3-3-3，利用圖 3-3-5a 我們可以找出相對應的 w_{HW}/w_{FW}=2.9，在根據先前的推論及假定，斷層錯動量(S)及上盤的變形帶(w_{HW}) 寬，分別為 1.24 及 100 公尺，進一步推算變形帶寬度約為 134 公尺，如此再利用圖 3-3-5c 或圖 3-3-6 我們將可得找出相對應的的關鍵偏差應變第二不變量$(II_{\varepsilon'}^{e})_c$ 值的指數 n 為-5.4，亦即 $4.0\times 10^{-6}=10^{-5.4}$，這值的合理性之討論可參及 Huang 及 Johnson(2010)。最後，我們將變形帶內的變形量與斷層跡的位置關係呈現在圖 3-3-9，以供人造建物安全設計時參考。

表 3-3-3 新城斷層之參數值

參數 **[單位]**	**測量值**	**設定值**	**變化值**	**計算值**
W_f, 斷層寬度[公尺]		15.8 x10^3		
w_{HW}，上盤變形帶寬度[公尺]	100[a]			
θ, 斷層角度 [°]	20° ~60°E[b]	30°E		
S, 斷層錯動量[d] [m]		1.24		
n, 關鍵偏差應變第二不變量值的指數(10^n)[]			Yes.	-5.4
$\frac{w_{HW}}{w_{FW}}$, 寬度比 []				2.9
w, 變形帶寬度 [公尺]				134

[a] *Lin et. al, [2007]; 石瑞銓等人, [2003]*

[b] *Chung, C. T.* ,[1963]; *黃鑑水等人, [1984];Chen. J. S. [1974] and others.*

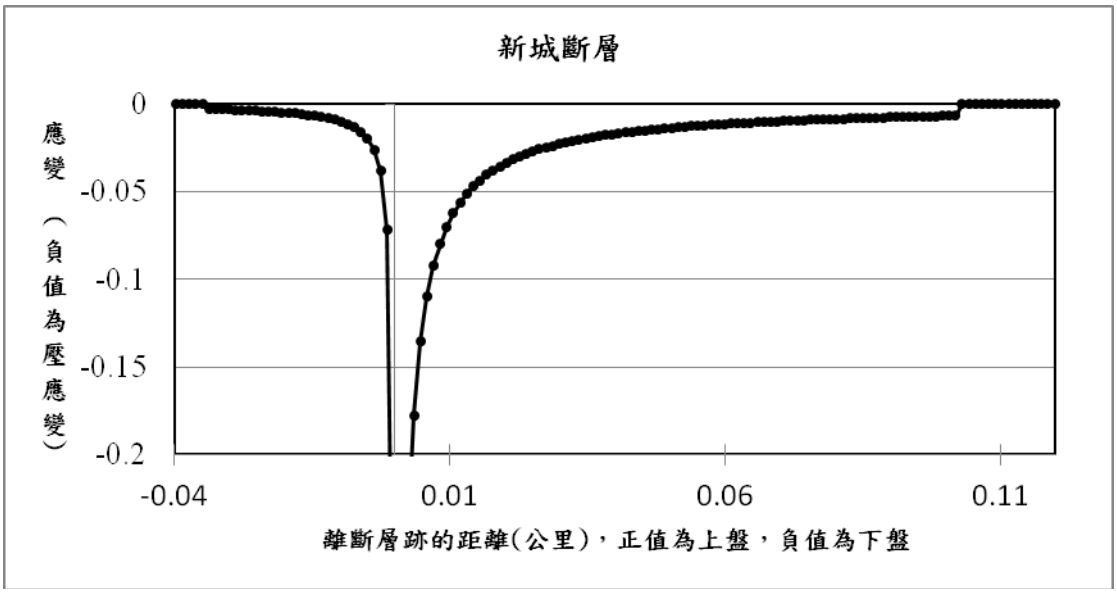


圖 3-3-9 新城斷層觸發變形帶中應變與離斷層跡相對位置的關係圖。◆為實際由數值模型所得的值。為避免數值運算上所造成的問題，鄰近斷層跡兩側的應變量並未表示，但可知離斷層跡越近應變量越大。

3-2. 有限差分法

本研究連續體之有限差分分析方法，乃是採用美國 Itasca 公司所研發之 Fast Lagrangian Analysis of Continua (FLAC)程式，此程式分成二維(2D)及三維(3D)之版本，為了考慮分析的方便性，本研究初期將以 FLAC 2D 為主要分析工具。以模擬當盲斷層之基盤抬升時，對逆衝盲斷層之上覆土層受到褶皺作用而產生變形的過程，並在不同基盤抬升量下於土層中破裂發展過程中，將斷層尖端點(fault tip)定出，以了解在上覆土層其破裂擴展之行為及其變形區之範圍。

A. 模型假設

假設二維數值模型所設定的之基本假設條件，如下分述

1. 為一傾向滑移斷層(dip slip fault)
2. 上覆土層為一均質(homogenous)且均向(isotropic)的土壤。
3. 基盤為一堅硬岩盤。
4. 基盤與上覆土層間存在一不整合面。

5. 下盤與上覆土層間之接觸摩擦行為，層間可滑動。

6. 上盤與上覆土層間無相對滑動之現象。

B. 分析流程

各步驟分述如下

1. 設定界面元素於基盤與上覆土層間

2. 重力平衡

3. 設定水平向大地應力

4. 將界面元素釋放以模擬斷層滑移，基盤與土層間之接觸摩擦情形

5. 施加固定邊界剛性位移，以模擬基盤之抬升

在上述的步驟 1 以及步驟 2 中，數值模型中模擬土層之網格為 80x20 網格數，建立一厚度為 10 公分、寬為 80 公分的二維數值分析模型，數值模型如圖 3-3-10~11 所示，處於平面應變(plane strain)狀態。為模擬基盤與上覆土層間之接觸摩擦行為，引入界面元素於基盤與上覆土層間(如圖 3-3-12 所示)，此時界面元素為鎖住(glue)的狀態，將上覆土層與基盤結合成一連續塊體，亦即覆土層與基盤間在此階段不可產生相對滑移。數值模型設定的邊界條件為：左右邊界僅限定節點於水平方向不能位移，鉛直方向可以自由抬升或是下陷，下方邊界則限定節點在水平、垂直方向皆不能移動，上方邊界則為一自由邊界。

在步驟 1、步驟 2 及步驟 3 完成時，界面元素仍然為鎖住的狀態，於上述的步驟 4 中，釋放(unglue)界面元素，以利當基盤開始滑移時，允許基盤與覆土層間可以有產生相對滑動。

在步驟 5 中，利用施加邊界位移沿斷層面做剛體運動(如圖 3-3-13 所示)，以模擬基盤滑移的過程。每次的滑移量不能夠太大，以免邊界的元素因為承受過大的應力而降伏，造成模擬的不正確，故每次沿斷層面的滑移量為 0.2 公分，隨即平衡所產生的不平衡力，再進行下一次的滑移，直到預定的滑移量為止。

C. 模擬參數

基本案例選用之參數包括上覆土層之材料、基盤與覆土層間之不整合面、基盤之材料(如表 3-3-4 所示)、以及斷層面之傾角參數，分別敘述如下：

1. 土層之材料參數：

模擬土層之材料相當於無凝聚性之砂土，材料組成律模式為 Mohr-Coulomb Plastic Model (莫爾-庫倫彈塑性模式)，當土壤尚未達到降伏前的應力-應變關係以線彈性行為考慮之，當土壤進入塑性之後，由於土壤之摩擦角等於膨脹角，其塑性之應力-應變關係遵守諧和流動法則(associated flow rule)。

(1) 土壤單位重(density)：1570 kg/m^3

(2) 變形模數：土壤揚氏模數 E 為 5 MPa，包生比(Poisson ratio)ν 為 0.33，在 FLAC 程式中所需給定的是變形模數為統體模數 K (bulk modulus)、及剪力模數 G (shear modulus)，可根據式 4-1、式 4-2 可計算得到，即可得統體模數 K＝4.99 MPa、剪力模數 G＝1.875 MPa。

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad \text{.....(4-1)}$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \text{.....(4-2)}$$

(3) 降伏準則：設定土壤摩擦角ϕ(frictional angle)＝30˚、膨脹角ψ (dilation angle)＝30˚、凝聚力 c (cohesion)＝0 kPa、抗張強度 t (tensile strength)＝0 kPa。設定之土壤摩擦角等於膨脹角，其塑性之應力應變關係乃遵守諧和流動法則。

(4) 靜止土壓力係數(coefficient of at-rest earth pressure) k_0：數值分析模型中採用k_0＝1-sinϕ，基本案例中給定土壤摩擦角為30˚，故設定靜止土壓力為0.5。

2. 基盤之材料參數：

模擬基盤材料相當於一岩石材料，由於數值模擬分析主要在於探討上覆土層之變形行為的發展，並不考慮基盤變形行為，因此基盤材料組成律模式選用 Elastic

Model(彈性模式)，模擬參數包括：

(1) 基盤單位重(unit weight)：2400 kg/m^3

(2) 變形模數：給定揚氏模數 E=5 GPa，包生比(Poisson ratio)ν 為 0.33，利用式 4-1、式 4-2 可計算得到程式中輸入的統體模數 K(bulk modulus)、及剪力模數 G (shear modulus)，其中統體模數 K=4.99 GPa、剪力模數 G=1.875 GPa。

3. 基盤與上覆土層間不整合面之參數：

為模擬基盤與上覆土層不整合面之摩擦性質，一界面元素於基盤與上覆土層間。此界面之抗滑動強度參數為參考土層材料參數，界面性質屬於 Coulomb sliding，其給定參數包括：

(1) 變形勁度：給定界面元素之正向勁度(normal stiffness，Kn)為 0.5 GPa、切向勁度(shear stiffness，Ks)為 0.5 GPa。

(2) 界面剪力強度：在基盤與土層間之界面上之剪力強度參數主要依據上覆土層剪力強度再做一些折減，數值分析模擬中，土壤與底部模擬基盤之不整合面間，則假設界面上之摩擦角為 2/3 倍土層之摩擦角，凝聚力為土層之 1/2 倍。此案例給定界面之強度參數為摩擦角(frictional angle)＝35˚、凝聚力(cohesion)＝0 kPa。

4. 斷層面之傾角參數：

數值分析模型之基本案例中，為假設斷層面之傾角為 24˚的情形。模擬過程中，每次沿斷層面給定邊界總滑移量為 0.4 公分，即給定滑移量之水平向分量為 0.364 公分、垂直向分量為 0.16 公分。

D. 基本案例之分析結果

從基本案例分析中，由不同基盤抬升量下，取出當時基盤抬升量下累積塑性剪應變之分佈圖，可以了解模擬的過程中，數值分析系統之累積塑性剪應變發展過程。

圖 3-3-14 顯示為分析網格於不同基盤抬升量下所承受之塑性累積剪應變分佈圖(contour)，其設定等高線間距(interval)為 5×10^{-2}。從圖 3-3-14 所示，模擬斷層初始尖端位置之網格在基盤抬升時會有一塑性剪應變集中之現象，隨著基盤一直抬升，其塑性剪應變分佈會由底部向上擴展，雖然數值分析仍為連續體力學分析，其行為相似於斷層破裂尖端由底部往上擴展(propagation)之現象。此外，隨著基盤一直抬升，靠近地表處亦存在一區域有較大的塑性剪應變分佈(如圖 3-3-14c 所示)，其原因可能接近地表之覆土層所受到覆土壓較低，故土壤之降伏強度亦較小，且又受到彎折(bending)作用所造成。隨著基盤持續的向上抬升，累積塑性剪應變分佈逐漸由底部向上發展，然後與上述受彎折作用造成累積塑性剪應變較大的區域相連，形成一塑性剪應變集中帶。此塑性剪應變集中帶亦為覆土層中最易發生破裂擴展行為的區域。

表 3-3-4 基本案例之上覆土層材料參數

模型尺寸	80 cm x 10 cm	凝聚力, c	0 kPa
楊氏模數, E	1.29 MPa	抗張強度, t	0 kPa
柏松比, ν	0.4	摩擦角, ϕ	35 度
統體模數, K	2.15 MPa	膨脹角, ψ	6 度
剪力模數, G	0.49 MPa	靜止土壓力係數, K_o	0.43
砂土乾單位重, γ	15.7 kN/m^3		

*模擬材料相當於較疏鬆之無凝聚性砂性土壤

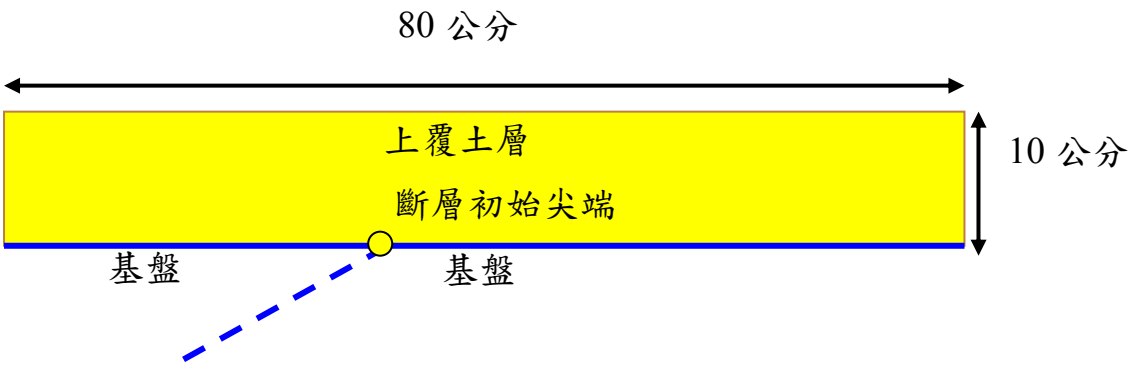


圖 3-3-10 FLAC 分析模型示意圖

註：

藍色粗線：基盤位置

藍色虛線：斷層面(fault plane)

黃色圓圈：斷層初始尖端

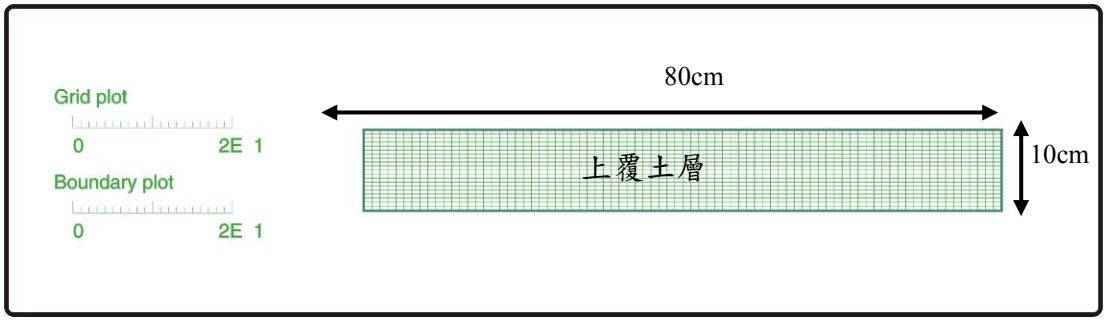


圖 3-3-11 數值分析模型之分析網格數及模型尺寸

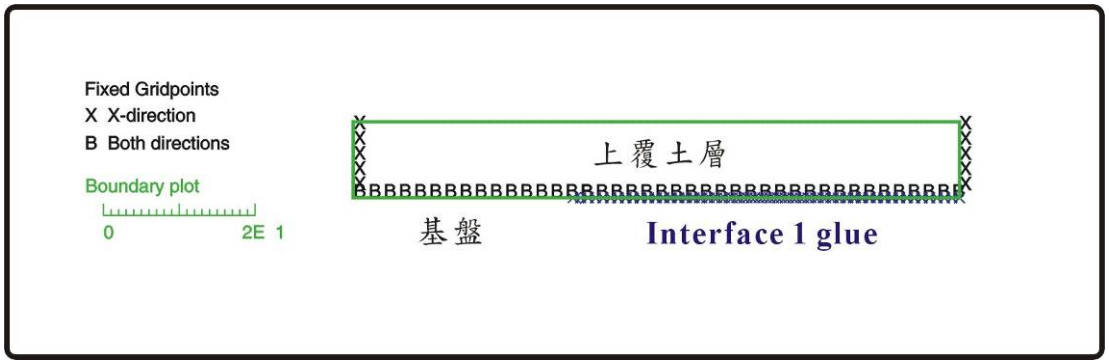


圖 3-3-12 數值分析模型初始狀態

(引入界面元素於上覆土層與基盤間，模擬土層與基盤之不整合面)

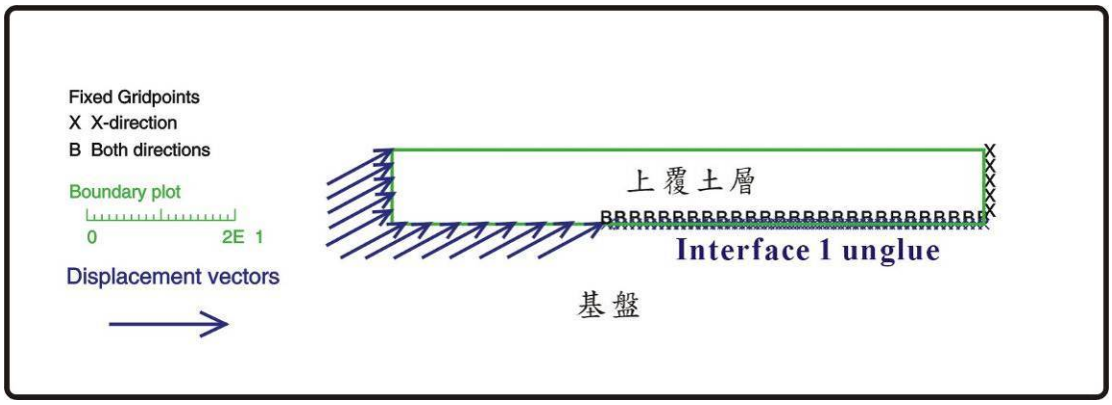
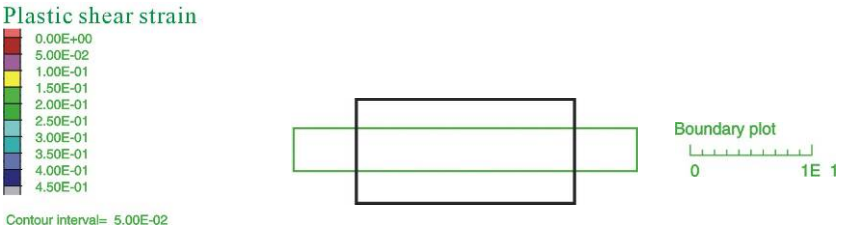


圖 3-3-13 數值分析模型給定邊界位移以模擬基盤抬升

(此時將界面元素釋放，模擬基盤與覆土層間不整合面之摩擦現象)

註：為模擬斷層傾角為 24°的情形。





(A)初始狀態



(B)斷層滑移 0.4cm



(C)斷層滑移 0.8cm



(D)斷層滑移 1.2cm



(E)斷層滑移 1.6cm



(F)斷層滑移 2.0cm

圖 3-3-14 不同斷層滑移量之累積塑性剪應變分佈圖

3-3. 分離元素法程式

本研究除了以物理模型進行試驗之外，尚規劃以數值方法為工具，分析物理模型無法處理之試驗項目。數值分析部分，包括以連續體模式進行有限差分法之分析，以及假設土層或岩層為顆粒組成，進行離散元素法(Discrete Element Method, DEM)之分析。相較於連續體模式，離散元素法處理顆粒與顆粒間之作用力，以及可能之鍵結強度，模擬顆粒群在邊界變形或外力作用下，隨時間變化對應之應力或應變之關係。另外，顆粒尺寸及數量左右模擬結果之準確性，但若要於模型中完全符合真實世界之顆粒組成狀況，則以現今電腦運算能力，尚不足以完整呈現真實之結果。在離散元素法模擬分析中，將視土壤或岩石狀況，把顆粒數及尺寸做適度的調整，使得模擬分析上得以有效率地完成，並在不損失太大模型分析結果精度上，進行參數敏感性分析。

本研究之離散元素法分析方法，乃是採用美國 Itasca 公司所研發之 Particle Flow Code (PFC)程式，此程式分成二維(2D)及三維(3D)之版本，為了考慮分析的方便性，本研究初期將以 PFC 2D 為主要分析工具。

A. 數值分析模型

目前為止以車籠埔斷層之竹山槽溝附近，土層分布及工程參數等資料較為完整，但由於竹山挖溝內看到之地層數量多、位態複雜，必需先進行簡化以利分析，，從竹山溝的鑽探可以看到地表為細砂質粉土及黏土，再往下是礫石層，再往下是岩盤。魏勇帆(2006)以斷層砂箱進行「砂土層覆蓋於黏土層上」及「黏土層覆蓋於砂土層上」之室內實驗，因此本研究為了比對室內砂箱實驗之結果以及模擬現地全尺寸之數值分析，將土層簡化為 2~3 層，分別模擬了「砂土層覆蓋於黏土層上」、「黏土層覆蓋於砂土層上」及「黏土層中間夾砂土層」三種案例，以上三種案例所模擬之土層厚度及斷層傾角列於表 3-3-5。

模擬斷層之室內砂箱實驗所使用之外盒寬度為 1 公尺，土層厚度為 0.2 公尺，斷層傾角有 24 度及 60 度兩種，模擬之斷盤抬升量最高為 0.08 公尺。顆粒生成部分，先

隨機於一指定空間產生所需數量及尺寸之顆粒，之後再加上重力使其自由降落，待內力平衡後即可針對不同模型分析需求，更改所需之微觀參數以進行分析。待顆粒堆疊完畢之後，於模型下方建立指定傾角之「斷層」，並在給定速率下視所需之斷層型態向上、向下或以其他型態移動，如圖 3-3-15 所示。待模型之位移達到分析所需之變位量後，即就斷盤抬升量、水平影響範圍、斷層破裂帶附近應變量等進行分析及討論，並將分析結果與魏勇帆於 2006 年所做之物理實驗做一比對及討論。

表 3-3-5 數值模擬規劃(模擬室內實驗)

試驗形式	斷層傾角	砂土層厚度	黏土層厚度
砂土層覆蓋於黏土層之上	60、24 度	10cm	10cm
黏土層覆蓋於砂土層之上	60 度	10cm	10cm
黏土層中間夾砂土層	60 度	6cm	上層 6cm，下層 8cm

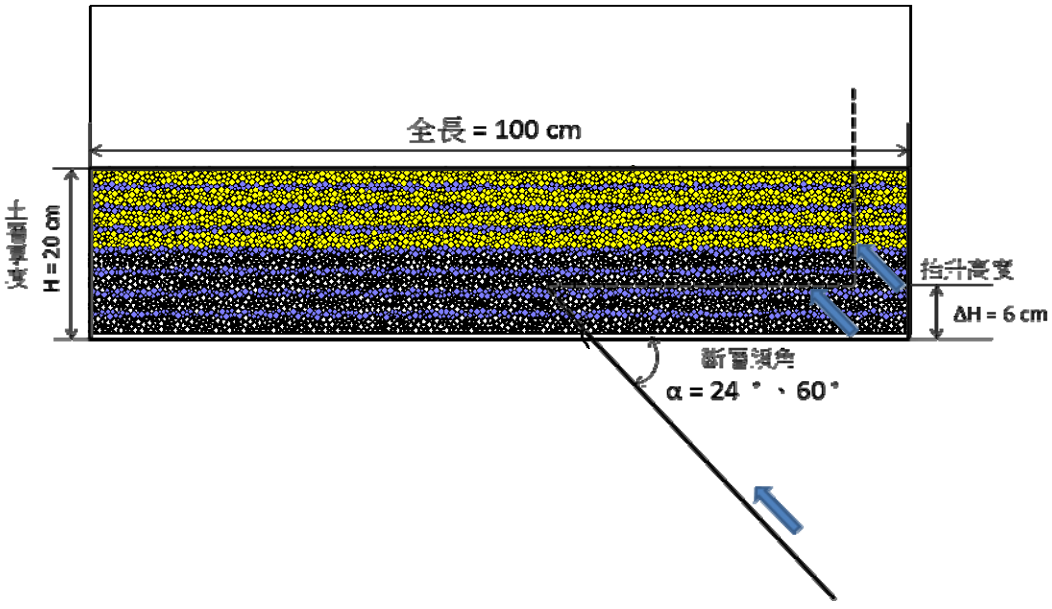


圖 3-3-15 數值模擬分析尺寸(模擬室內實驗)

B. 數值分析參數

本研究所使用之微觀力學參數如下表 3-3-6，其中顆粒顆粒勁度乃參照粘為東(2010)建議之數值。鍵結力(Parallel bond strength)的部份，砂土視為無凝聚力因此沒有設鍵結力，而黏土之鍵結力則是利用參數敏感度分析所求得，以下有詳細的比較。摩擦角的部份砂土是假設為 30 度，而黏土則沒有摩擦角。土壤(顆粒)單位重皆假設為 1.6 kN/m^3，土壤顆粒與斷盤界面(砂箱之外盒)摩擦係數則為 0.43。

目前本研究分別針對土層分類(砂土或黏土)、黏土層鍵結力、斷層傾角及斷盤抬升量等參數進行分析，所使用之參數整理成一參數矩陣如表 3-3-7。

表 3-3-6 數值分析所用參數

參數		砂	黏土
顆粒勁度	Kn(N/m)	5.16×10^6	5.16×10^6
	Ks(N/m)	5.16×10^6	5.16×10^6
Parallel bond 鍵結力(N)		0	1×10^4 1×10^3 1×10^2
摩擦角(度)		30	0
土壤(顆粒)單位重 γ(kN/m^3)		1.6	1.6
土壤與斷盤界面摩擦係數		0.43	0.43

表 3-3-7 參數矩陣

參數	黏土層鍵結力	斷層傾角	斷盤抬升量
黏土層鍵結力	1×10^4 1×10^3 1×10^2	60 度	6 公分
斷層傾角	1×10^3	24 度 60 度	6 公分
斷盤抬升量	1×10^3	60 度	1 公分 2 公分 3 公分 4 公分 5 公分 6 公分

C. 地表變形及斷層帶之描述方式

為描述試驗過程中上覆土層受斷盤抬升所產生的破裂跡的分佈範圍與分佈型態，以下將使用參數如下圖 3-3-16 示。其中 W 為斷層剪切帶前緣擴展至地表與原斷盤中斷層尖端位置之水平距離，亦稱影響範圍；θ_L 為斷層處剪切帶切線方向與水平之夾角；θ_U 為斷層帶出露處斷層崖坡面與水平之夾角。

為了在數值模擬過程中清楚分辨砂土層及黏土層之位置及斷層帶在覆土層中之發展情形，如下圖 3-3-17 所示，本研究將砂顆粒以黃色的顆粒表示，將黏土顆粒以白色的顆粒表示，並每間隔 2.5 公分畫一層 1 公分的藍色顆粒，其參數不會調整，只是方便之後觀察砂土層中之斷層發展情形。

在黏土層中，因為顆粒設有鍵結力，所以可以直接追蹤鍵結被打斷的地方，如圖 3-3-17 所示，黏土層中紅點與黑點的地方代表鍵結被打斷的位置，所以我們可以視紅點與黑點集中的地方為黏土層中的斷層帶。在砂土層中因為沒有設鍵結力，所以無法以同樣的方式定義斷層帶，但可以從藍色顆粒層轉折較大之處來定義斷層帶的上下邊界，如圖 3 中砂土層裡兩段紅線中間所包含的區域，在本研究視為砂土層裡的斷層帶。

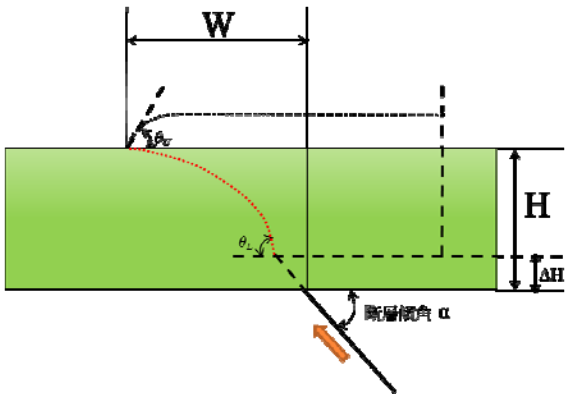
圖例	說明
	W=斷層剪切帶前緣擴展至地表(斷層帶出露處)與原斷盤中斷層尖端位置之水平距離 H=上覆土層厚度 ΔH = 斷盤抬升量 θ_L=斷層尖端處，剪切帶切線方向與水平之夾角 θ_U=斷層帶出露處斷層崖坡面與水平之夾角 α = 斷層傾角

圖 3-3-16 物理試驗參數示意圖

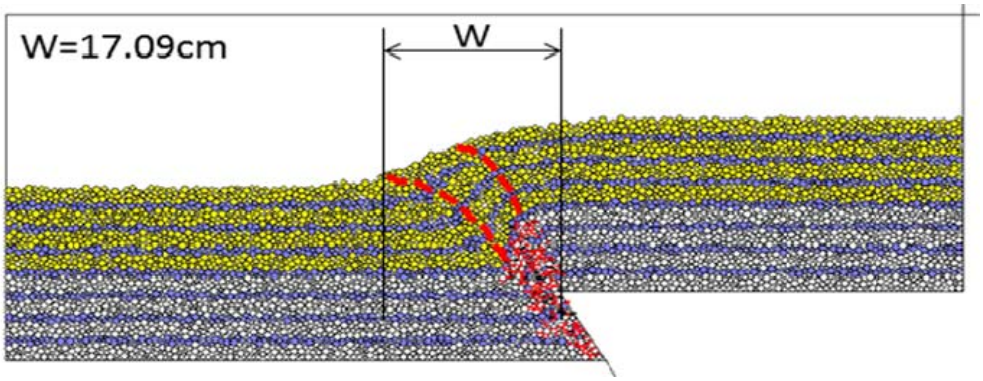


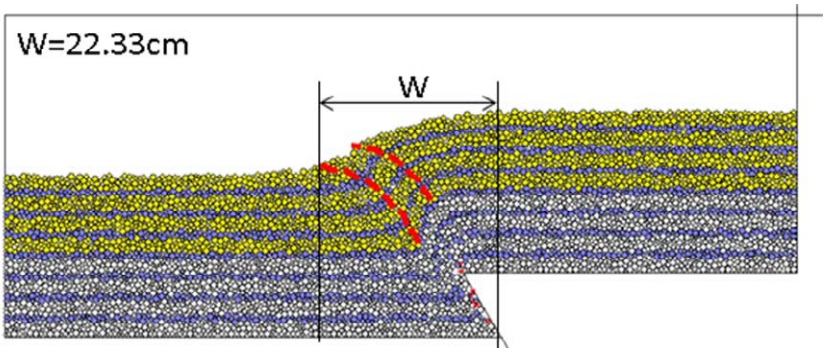
圖 3-3-17 數值模擬模型

D. 黏土層鍵結力之參數敏度分析

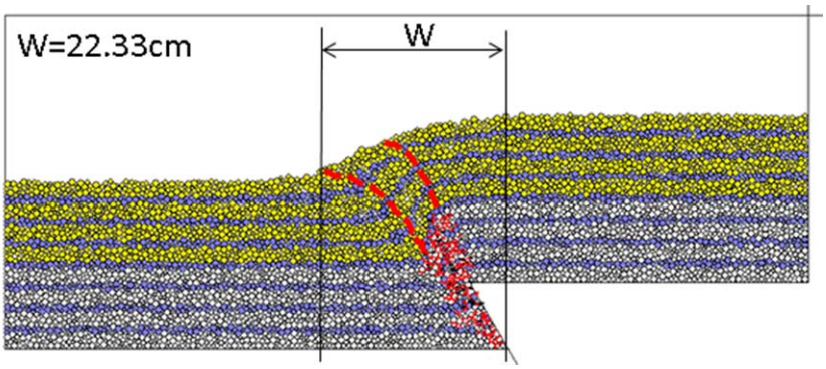
黏土為具有凝聚力之土壤，為了在數值模中模擬黏土的凝聚力，必需為黏土層的顆粒加上鍵結力，但由於目前尚缺乏由凝聚力(巨觀參數)轉換成鍵結力(微觀參數)之公式，所以本研究以鍵結力為 1×10^{2}(N)、1×10^{3}(N)、1×10^{4}(N)三種數值去模擬「砂土覆蓋於黏土層上」及「黏土覆蓋於砂土層上」兩組試驗。取斷盤抬升量為 6 公分之模擬結果，如下圖 3-3-18，可以看到在「砂土覆蓋於黏土層上」這一組模擬中鍵結力為 1×10^{4}(N)時在黏土層中完全看不到斷層帶，只能由砂土層中藍色顆粒層之變形來研判斷砂土層中的斷層帶，而鍵結力為 1×10^{2}(N)及 1×10^{3}(N)時則可以在黏土層中看到斷層帶。在「黏土覆蓋於砂土層上」這一組模擬中，如下圖 3-3-19，鍵結力為 1×10^{4}(N)時在黏土層中仍完全看不到斷層帶，因此只能用地表變形較大的地方視為斷層帶的邊界，而鍵結力為 1×10^{3}(N)時可以看到明顯的斷層帶，鍵結力為 1×10^{2}(N)時雖可以看到明顯的斷層帶，其行為已有點類似無凝聚力。因此，從以上兩組實驗中我們將黏土層之鍵結力定為 1×10^{3}(N)。以上各組模擬之斷層帶影響範圍列於下表 3-3-8。

表 3-3-8 參數敏感度分析結果

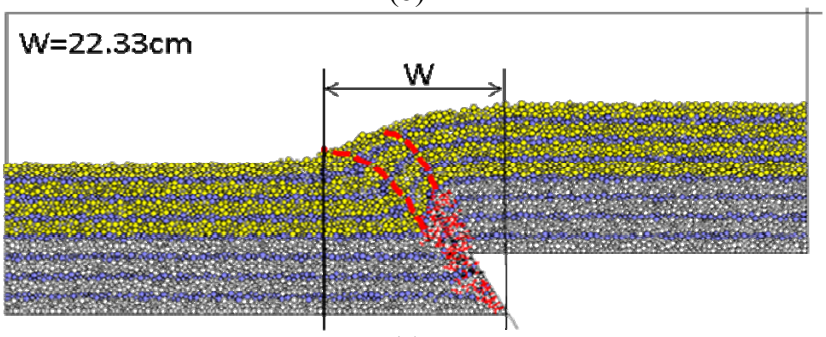
實驗類型	鍵結力	W/H	θ_U(度)
砂土覆蓋於黏土層上	1×10^4(N)	1.06	23
	1×10^3(N)	1.06	25
	1×10^2(N)	1.06	30
黏土覆蓋於砂土層上	1×10^4(N)	1.13	33
	1×10^3(N)	1.32	26
	1×10^2(N)	1.55	20



(a)



(b)



(c)

圖 3-3-18 砂土層覆蓋於黏土層之上

(a) 鍵結力 1×10^4(N) 、(b) 鍵結力 1×10^3(N)、 (c) 鍵結力 1×10^2(N)

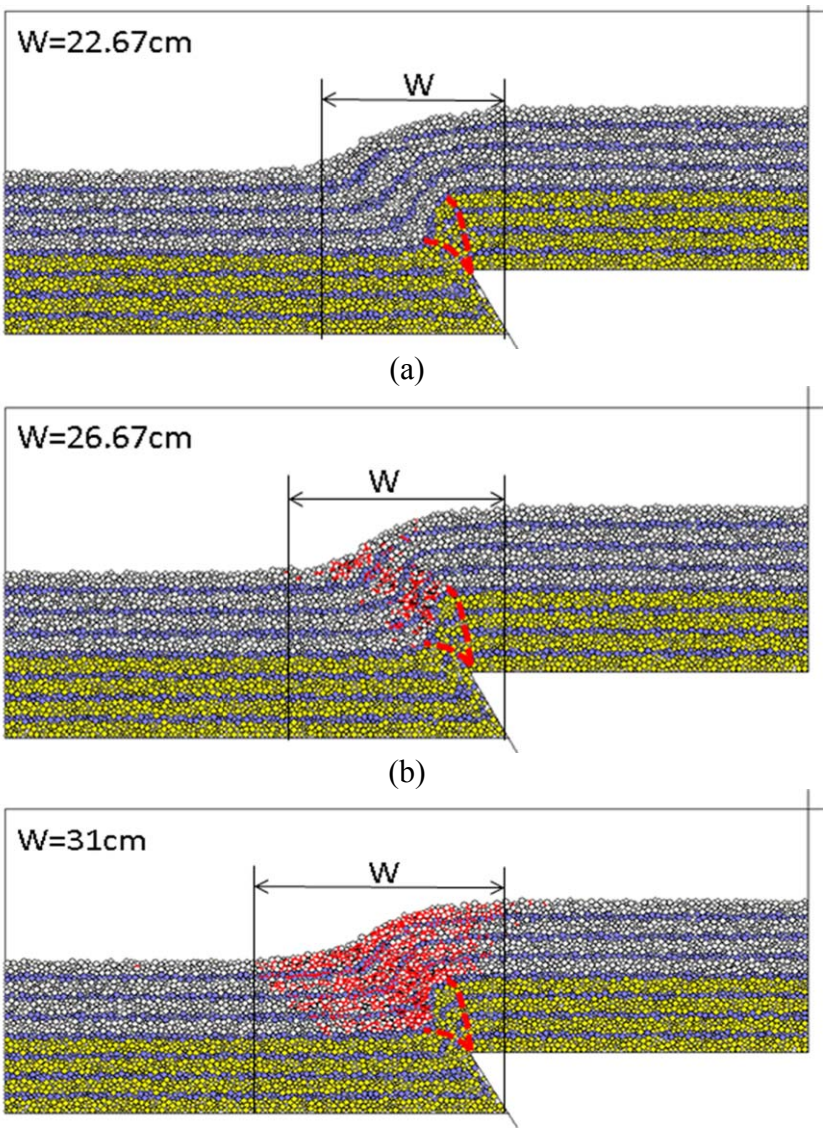


圖 3-3-19 黏土層覆蓋於砂土層之上

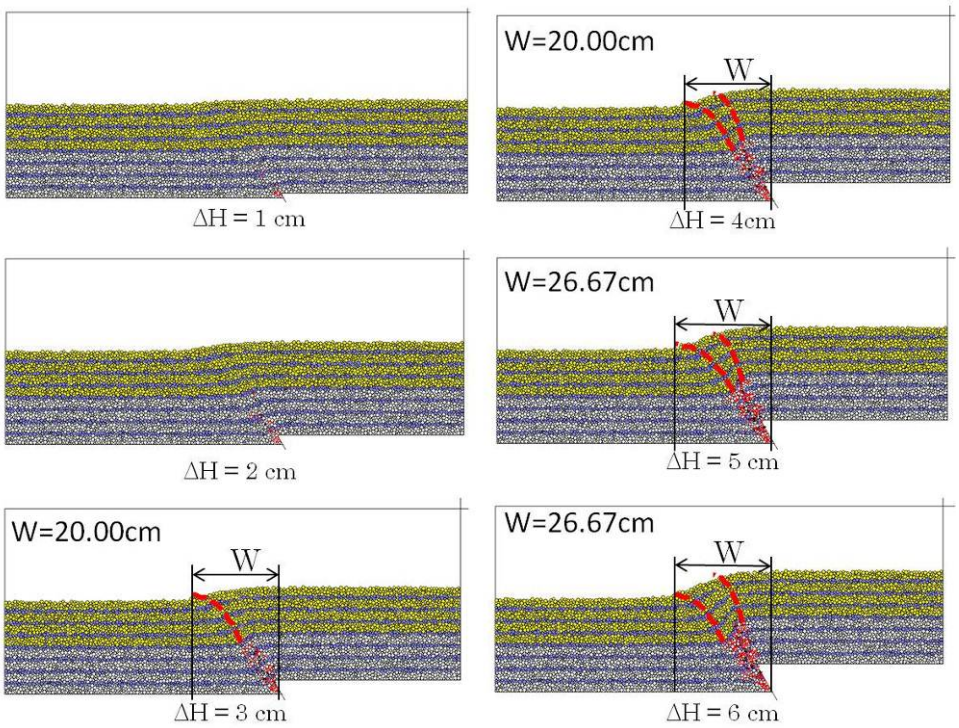
(a) 鍵結力 1×10^{4}(N) 、(b) 鍵結力 1×10^{3}(N)、 (c) 鍵結力 1×10^{2}(N)

E. 斷層帶之發展

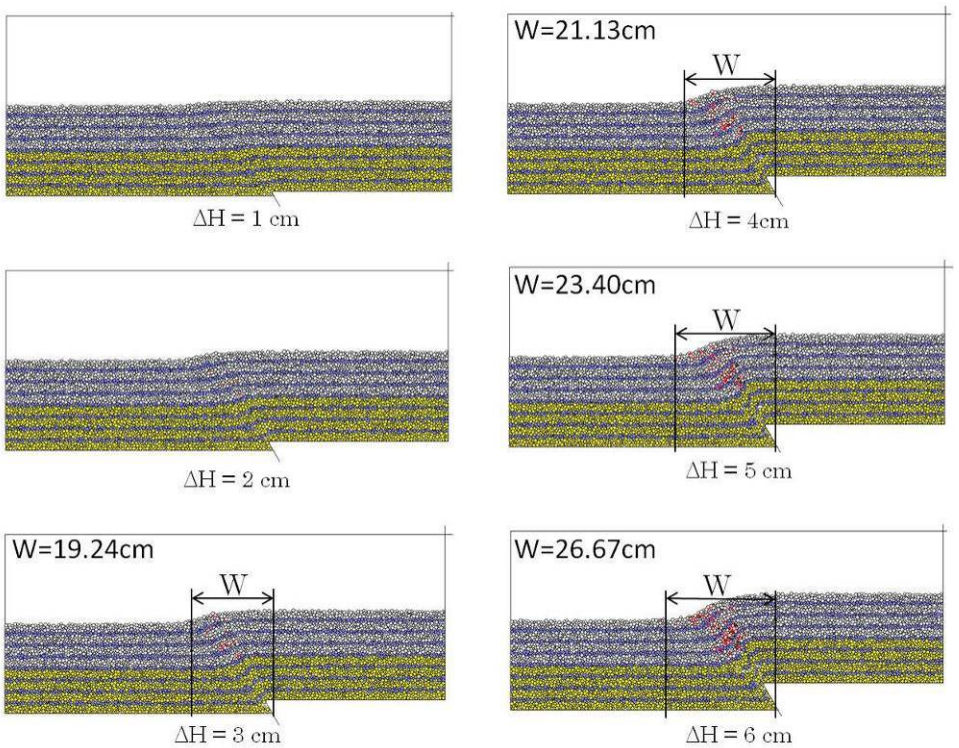
根據上述定義斷層帶之方法，套用在不同斷盤抬升量，可以看到在模擬斷層錯動的過程中斷層帶的發展趨勢，如圖 3-3-20(a)為砂土覆蓋於黏土層上之模擬，可以看到隨著斷盤抬升，斷層帶由斷盤的尖端開始向上發展，在斷盤抬升量為 3 公分時，斷層帶已發展至地表，其影響範圍為 20 公分，而當斷盤抬升量為 6 公分時，影響範圍擴大至 26.67 公分。如圖 3-3-20(b)為黏土覆蓋於砂土層上之模擬，可以看到隨著斷盤抬升，斷層帶由斷盤的尖端開始向上發展，在斷盤抬升量為 3 公分時，斷層帶已發展至地表，其影響範圍為 19.24 公分，而當斷盤抬升量為 6 公分時，影響範圍擴大至 26.67 公分。各斷盤抬升量所形成之斷層影響範圍如表 3-3-9 所示。

表 3-3-9 不同斷盤抬升量所形成之斷層影響範圍

實驗類型	斷盤抬升量	斷層影響範圍(W)
砂土覆蓋於黏土層上	1 公分	0 公分
	2 公分	0 公分
	3 公分	20.00 公分
	4 公分	20.00 公分
	5 公分	26.67 公分
	6 公分	26.67 公分
黏土覆蓋於砂土層上	1 公分	0 公分
	2 公分	0 公分
	3 公分	19.24 公分
	4 公分	21.13 公分
	5 公分	23.40 公分
	6 公分	26.67 公分



(a)



(b)

圖 3-3-20 不同斷盤抬升量下之斷層帶的位置

(a)砂土覆蓋於黏土層 (b)黏土覆蓋於砂土層

F. 砂黏土互層形態對斷層影響範圍之影響

本節探討在斷層角固定(60 度)時，不同的砂黏土互層形態對斷層影響範圍的影響，由圖 3-3-21 可以看到當斷盤抬升量為 6 公分時的結果比較，由表 3-3-10 的結果可以看到，純砂土的情況底下斷層影響範圍最小，為 17.8 公分；而純黏土的情況底下斷層影響範圍最大，為 26.4 公分；互層為兩層的時候，砂土覆蓋於黏土層上的結果是 21.2 公分，黏土覆蓋於砂土層上的結果是 26.4 公分；互層為三層的時候，砂土中間夾黏土層的結果是 23.6 公分，黏土中間夾砂土層的結果是 25.8 公分。由此結果我們可以看到最靠近地表的土層影響很大，如果是砂土層，越厚則影響範圍越大；如果是黏土層，越厚則影響範圍越小。根據此一結論，本研究進行一組黏土覆蓋於砂土層上的驗證模擬，這一組模擬的黏土層厚度設為 1/3H，也就是與黏土中間夾砂土層的模擬中地表的黏土層厚度一樣，其模擬結果如圖 3-3-21g，斷層影響範圍與斷層崖傾角皆與黏土中間夾砂土層之模擬結果一樣的。

表 3-3-10 不同砂黏土互層形態所形成的斷層影響範圍(W/H)

圖號	實驗類型	W(cm)	W/H	θ_U(度)
3-3-21a	純砂土	17.8	0.89	19
3-3-21b	砂土覆蓋於黏土層上	21.2	1.06	20
3-3-21c	砂土中間夾黏土層	23.6	1.18	22
3-3-21d	純黏土	26.4	1.32	28
3-3-21e	黏土覆蓋於砂土層上	26.4	1.32	26
3-3-21f	黏土中間夾砂土層	25.8	1.29	20
3-3-21g	黏土覆蓋於砂土層上(黏土層厚為 1/3H)	25.8	1.29	20

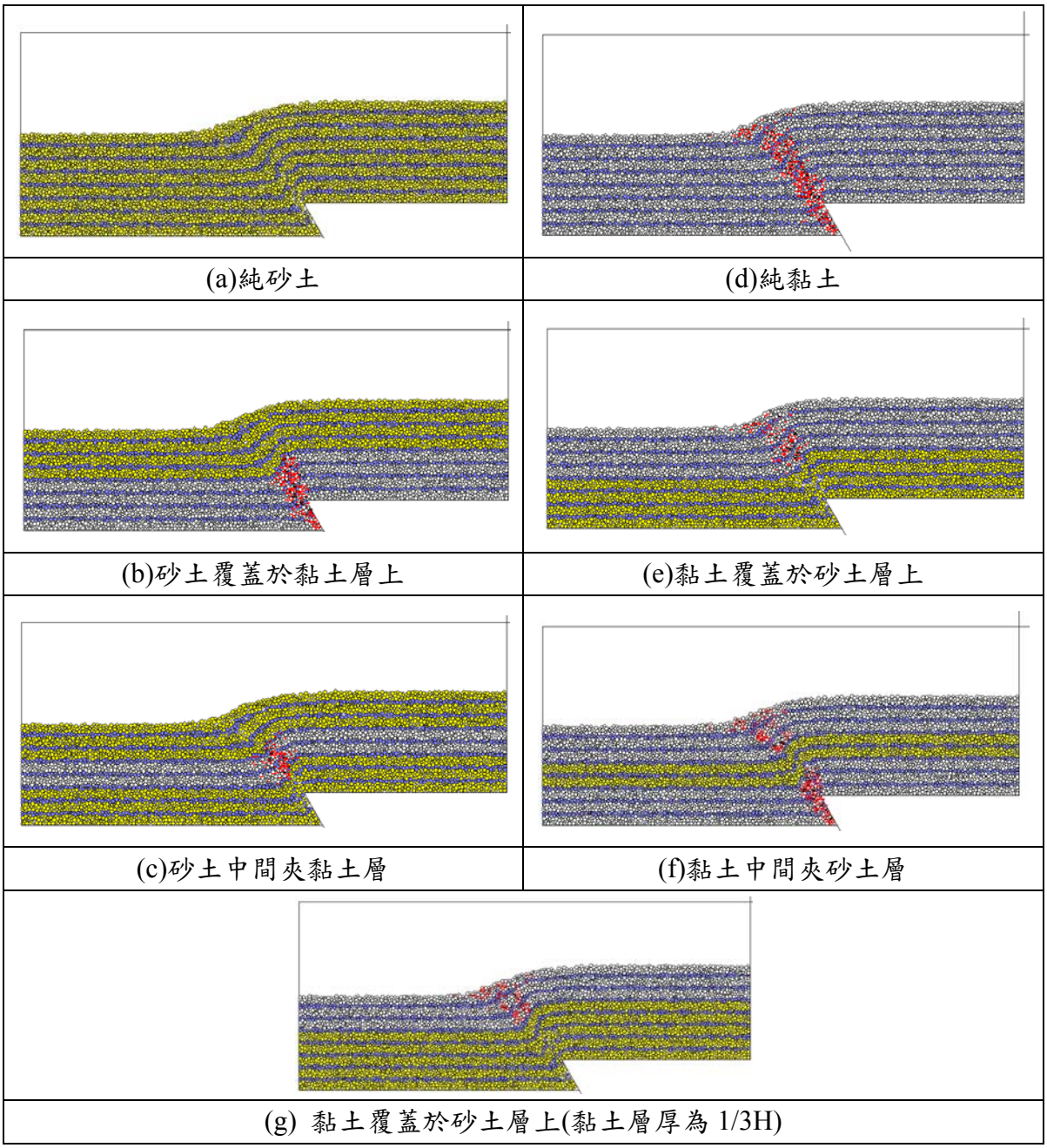
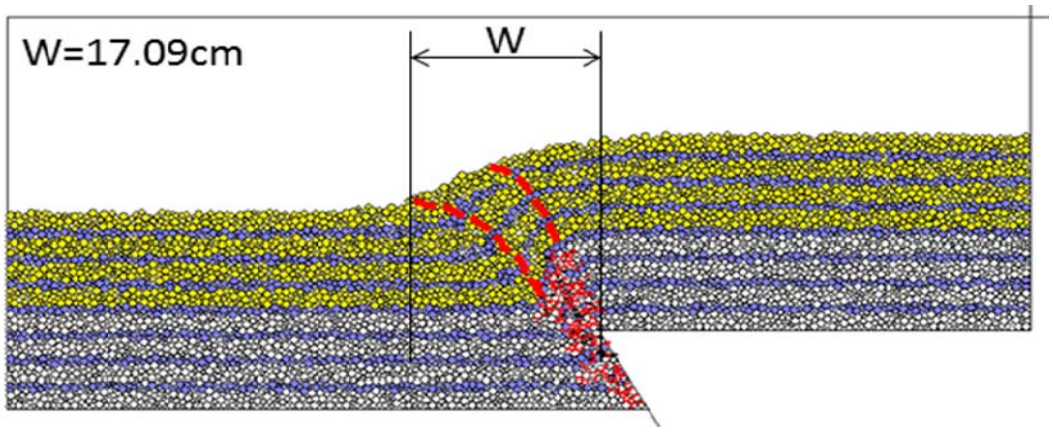


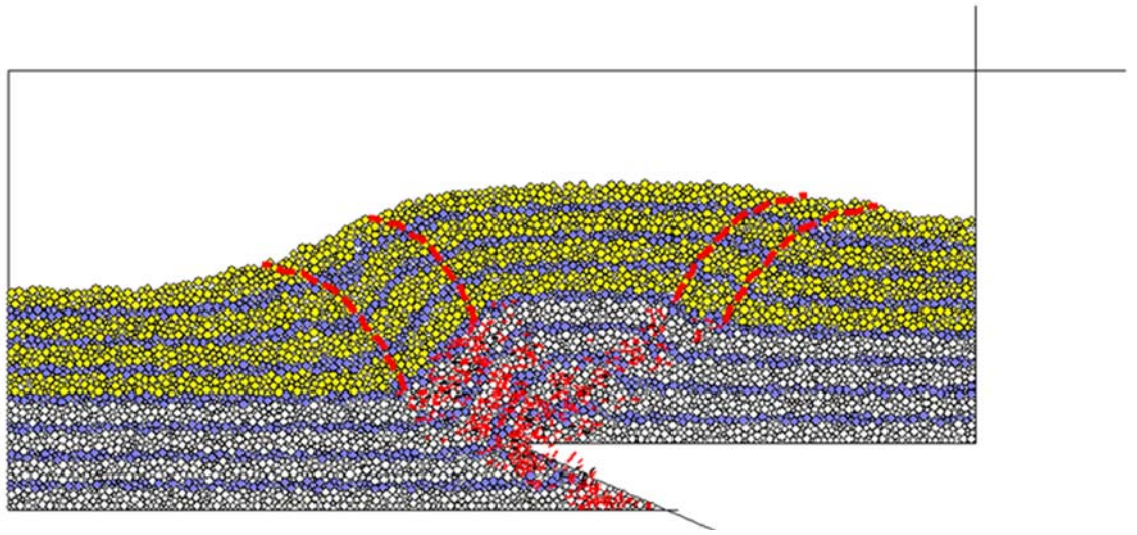
圖 3-3-21 砂黏土互層形態對斷層影響範圍(W/H)之影響

G. 斷層傾角之影響

由圖 3-3-22 可以看到在斷層傾角較陡時斷層帶較窄，在地表形成的斷層崖較緩。而當斷層傾角較緩時，斷層帶寬度較寬，在地表形成的斷層崖較陡，由黏土層中的斷層帶分佈中可以看到明顯的背衝斷層，在砂土層中可以由染色砂的彎曲的位置看到同樣的背衝斷層。



(a)

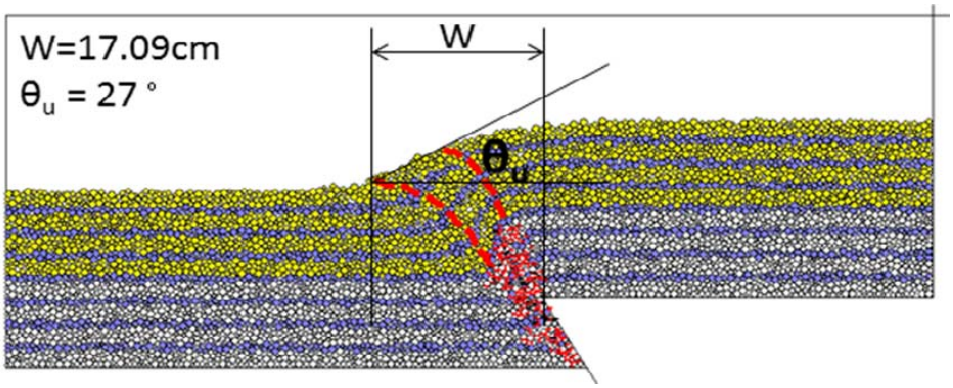


(b)

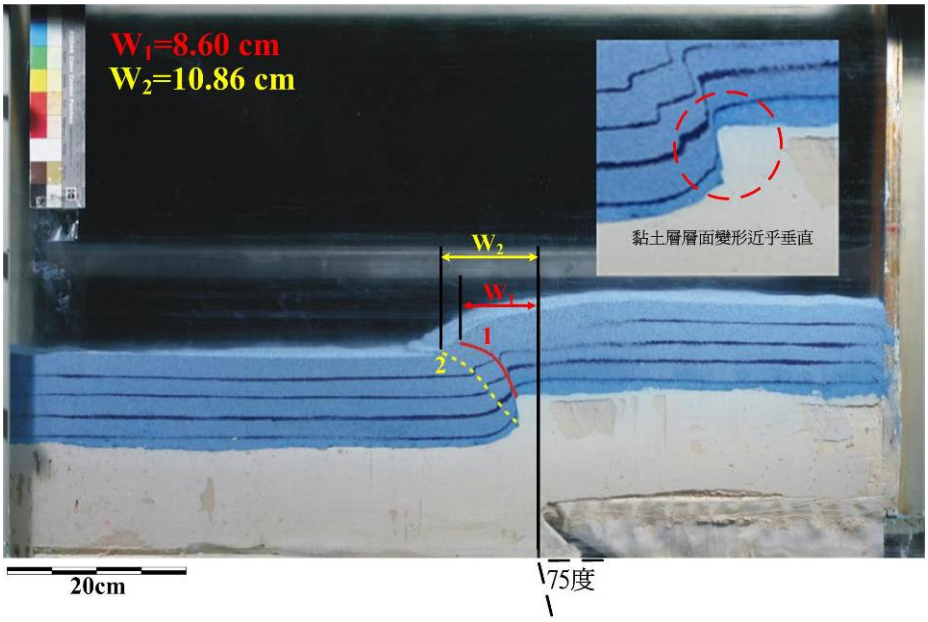
圖 3-3-22 砂土層覆蓋於黏土層之上 (a) 斷層傾角 60 度(b) 斷層傾角 24 度

H. 比對前人之物理實驗結果

魏勇帆於 2006 年進行砂土覆蓋於黏土層上之室內砂箱實驗，其砂箱寬度為 1 公尺，砂土及黏土層厚度各為 10 公分，與本模擬之尺寸皆相同，唯當時所做之斷層傾角為 75 度，因此只能拿來與本模擬中斷層傾角 60 度之結果相比。比較斷盤抬升量為 6 公分時，斷層擴張距離為 17.09 公分，大於物理實驗之結果。地表變形的部份，數值模擬之 θ_U 為 27 度，接近物理實驗之 29 度。而黏土層層面變形近乎重直，也是接近砂箱實驗之結果(如圖 3-3-23 所示)。



(a)



(b)

圖 3-3-23 較數值模擬與室內實驗(a)數值模擬(b)室內實驗(魏勇帆，2006)

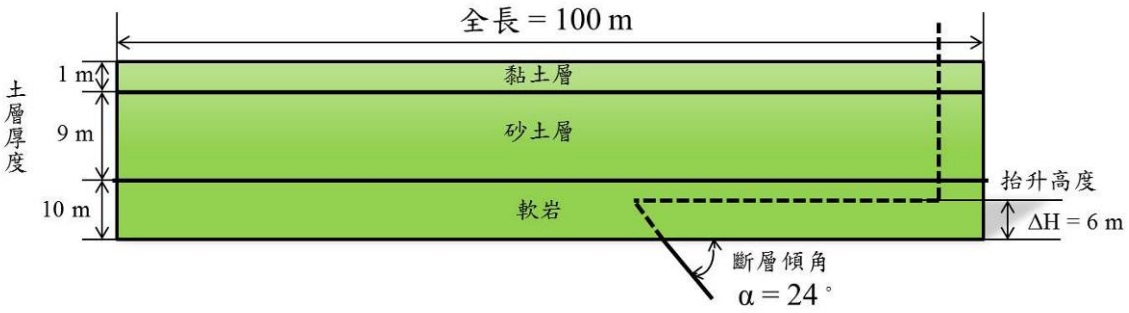
I. 模擬現地狀況

本研究模現地狀況分別為車籠埔斷層及新城斷層，模擬之尺寸設定分別是參考兩個斷層之槽溝開挖所看到的結果，車籠埔斷層之模擬最上層為 1 公尺厚的黏土層，其下是 9 公尺的砂土層，再來是一層 10 公尺厚的軟岩，底下才是岩盤；新城斷層的模擬最上層是 4 公尺厚的黏土層，其下是 6 公尺厚的軟岩，底下是岩盤，如圖 3-3-24，而其他基本參數見表 3-3-11。

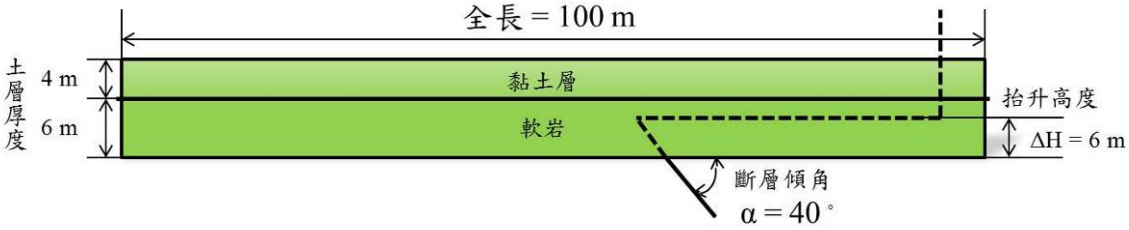
當抬升量為 6 公尺時模擬結果如圖 3-3-25，在車籠埔斷層的模擬中可以看到上盤裡的軟岩形近乎成垂直的背斜構造，且原來在上面的軟岩有被捲動而跑到下面的趨勢，地表的黏土層則是有局部增厚的現象，並且在這個結果中我們也可以看到逆(背)衝斷層的出現；而在新城斷層的模擬中可以看到上盤的軟岩也有被捲動而跑到下面的趨勢，且在黏土層中有很明顯的局部增厚的現象。由於槽溝開挖所看到的結果並不只是一次動層錯動所造成的，而是多次斷層錯動，加上侵蝕、堆積等營力所造成的結果，比較本研究之模擬結果與新城斷層 1 號槽溝的結果後可以推測：當逆斷層錯動後上盤抬升，較易被侵蝕，而被風化及搬運的土壤沉積在下盤，之後又再錯動，如此循環形成今日的結果(圖 3-3-25b)。

表 3-3-11 現地狀況數值模擬之基本參數

斷層	車籠埔斷層	新城斷層
斷層傾角(度)	24	40
顆粒勁度	5.16×10^6	5.16×10^6
顆粒單位重 γ(kN/m^3)	1.6	1.6
砂土鍵結強度(N)	0	0
砂土摩擦角(度)	30	30
黏土鍵結強度(N)	1×10^3	1×10^3
黏土摩擦角(度)	0	0
軟岩鍵結強度(N)	1×10^4	1×10^4
軟岩摩擦角(度)	0	0

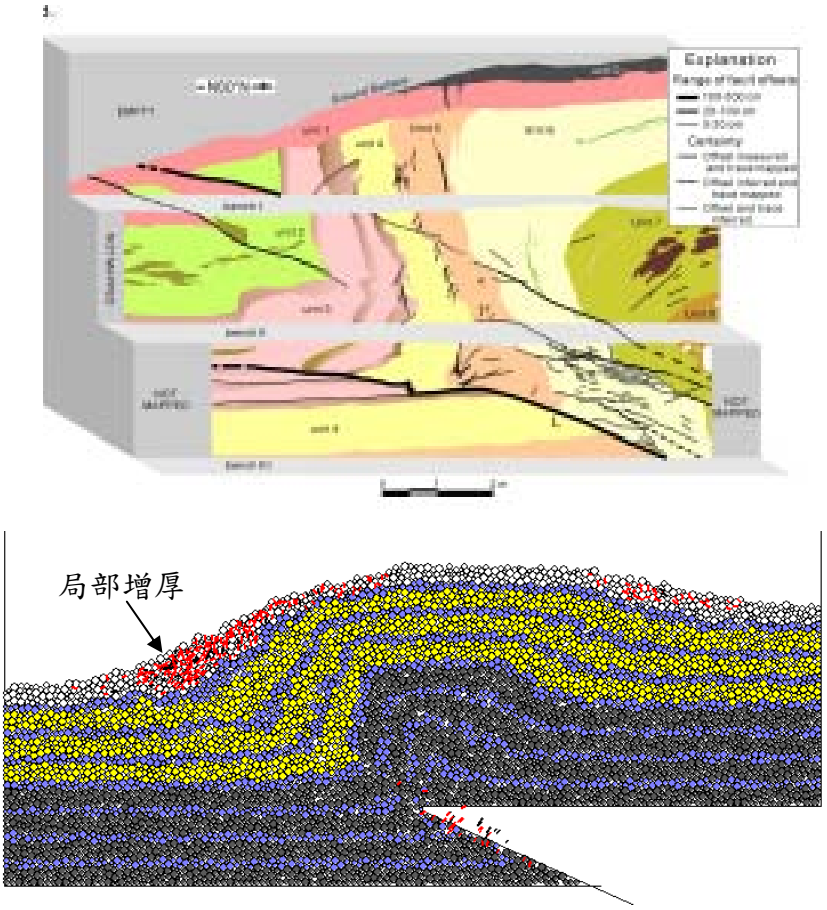


(a)車籠埔斷層數值分析之尺寸

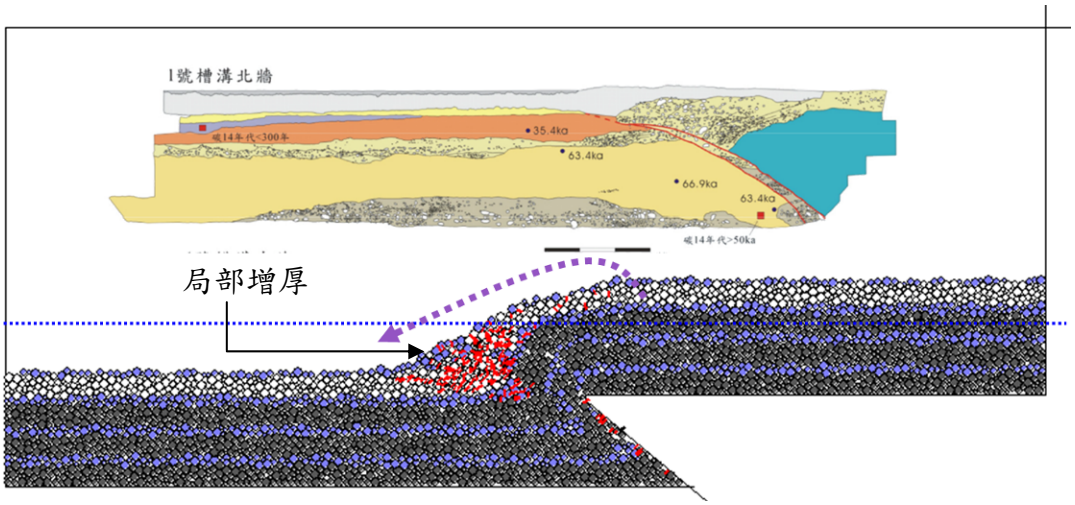


(b)新城斷層數值分析之尺寸

圖 3-3-24 現地狀況數值模擬之尺寸



(a)車籠埔斷層數值分析結果



(b)新城斷層數值分析結果

圖 3-3-25 現地狀況與數值模擬結果比較

J. 地表結構物對斷層帶發展範圍之影響

本研究為討論地表結構物對斷層帶發展範圍之影響，比對鐘春富(2007)所進行之砂實驗，如圖 3-3-26 所示，地表結構物之寬度為 B，其左側邊界與原斷盤中斷層尖端位置之水平距離為 x^*，本研究分別進行了 x^*為 0.5B、1.0B、1.5B、2.0B 四組實驗，而地表結構物之均布載重為 q，模擬中將 q 設為 0.5γH。模擬結果如圖 3-3-27，當 x^*為 0.5B 時斷層影響範圍為 24.09 公分，基礎與水平方向之旋轉角度為 18 度；當 x^*為 1.0B 時斷層影響範圍為 26.82 公分，基礎與水平方向之旋轉角度為 13 度；當 x^*為 1.5B 時斷層影響範圍為 10.91 公分，基礎與水平方向之旋轉角度為 0 度；當 x^*為 2.0B 時斷層影響範圍為 19.09 公分，基礎與水平方向之旋轉角度為 0 度；由這四組結果比較，可以看到當 x^*小於 1.0B 的時候，斷層發展之軌跡影響較小，基礎旋轉角度較大，而當 x^*於 1.0B 的時候，斷層發展受到結構物重力之影響，影響範圍變小，且基礎之旋轉角度較小，與鐘春富(2007)之結果(圖 3-3-28)相比頗為接近，其結果比較整理於表 3-3-12。

表 3-3-12 現地狀況數值模擬之基本參數

x^*	本研究			鐘春富(2007)		
	W(cm)	W/H	θ_U(度)	W(cm)	W/H	θ_U(度)
0.5B	24.09	1.20	18	22.7	1.14	7.8
1.0B	26.82	1.34	13	27.7	1.39	14.5
1.5B	10.91	0.55	0	21.9	1.10	3.5
2.0B	19.09	0.95	0			

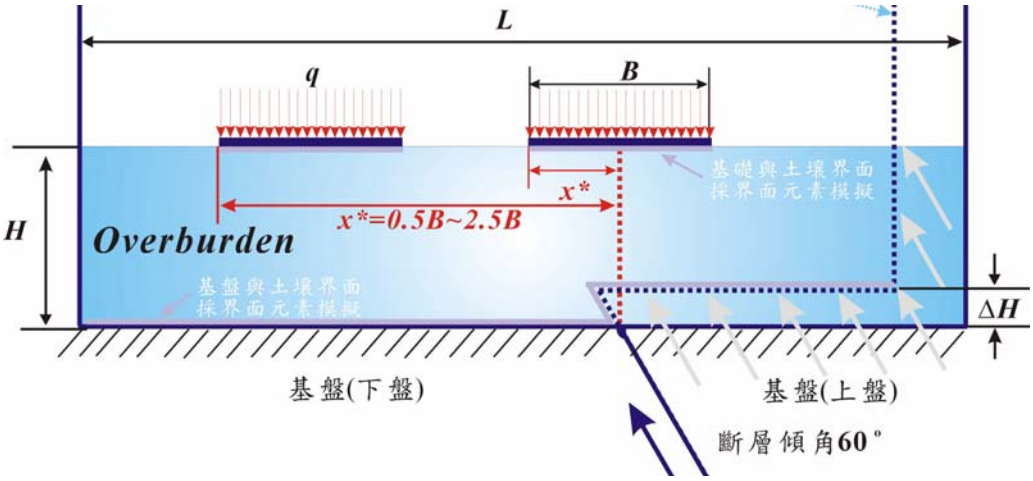
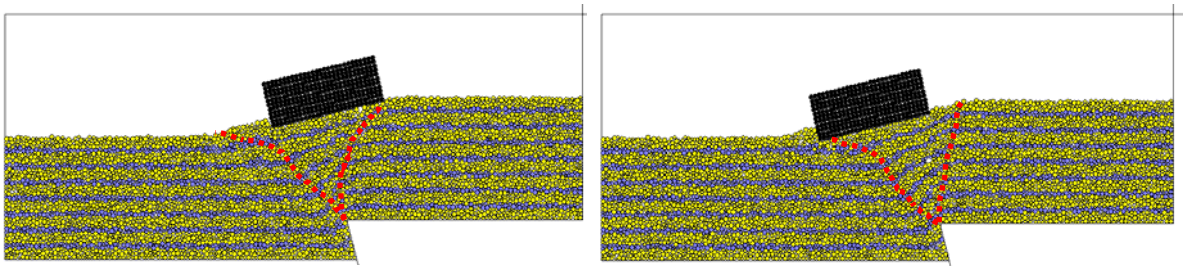
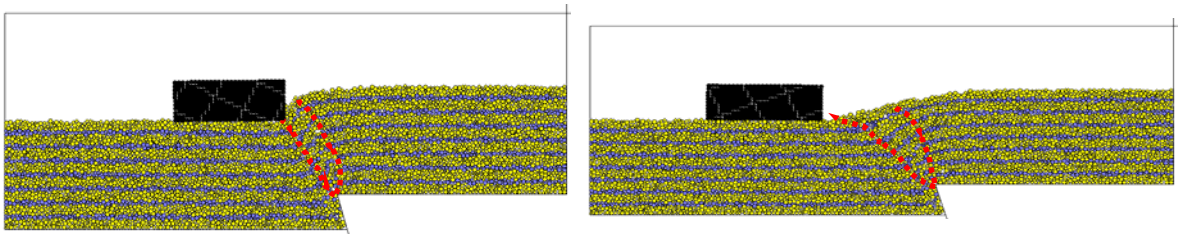


圖 3-3-26 地表結構物對斷層帶發展範圍之影響砂箱實驗尺寸示意圖

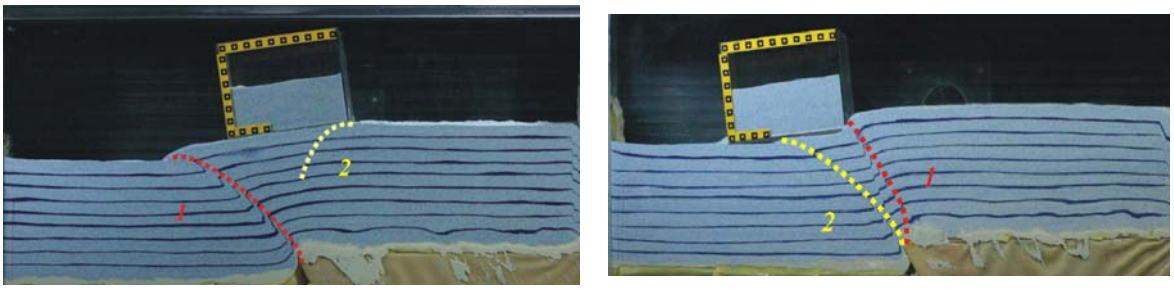


(a)x^*=0.5B　　(b)x^*=1.0B

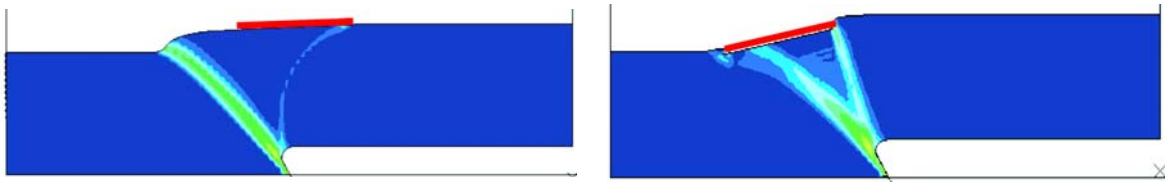


(c)x^*=1.5B　　(d)x^*=2.0*

圖 3-3-27 地表結構物對斷層帶發展範圍之影響數值分析結果



砂箱實驗結果



數值分析軟體 ABAQUS 分析結果

(a) x^*=0.5B　　(b)x^*=1.5B

圖 3-3-28 地表結構物對斷層帶發展範圍之影響砂箱實驗結果，鐘春富(2007)

第四章、研究成果

1. 現地調查

A. 車籠埔沿線都會區現況觀察，及現地調查五處房舍重建區域，部分房舍採原地重建、結構扶正或加強基礎等方式。

B. 針對車籠埔斷層沿線型態差異，分別於現地觀察斷層活動對地表影響範圍，及地表建物對斷層剪出帶的影響。

C. 斷層錯動引致地表變形型態：**破裂前緣、建物抬高、橫移斷裂**，地表建物損毀修復方式：**拆除重建、原址扶正。**

表 4-1 現地斷層錯動引致地表變形型態及因應方式

鄰近房舍災損	位移型態	結構物距離	破壞型態	因應方式
1(中正公 園)	逆衝	1 公尺	傾斜	扶正
2(中正公 園)	逆衝	1 公尺	倒塌	拆毀
3(一江橋)	逆衝	10 公尺	傾斜	扶正
4(廊子坑路)	橫移	1 公尺	傾斜	扶正
			倒塌	拆毀

D. 透過斷層沿線地質鑽井資料，推估土層簡化參數，並討論增加三鑽孔共 60 公尺以補充參數資料。

E. 三鑽孔選定為車籠埔斷層 2 孔(豐原中正公園內-北井、中正公園槽溝舊址旁-南井)及新城斷層 1 孔(舊篤行營區內)

F. 鑽井位置：中正公園北井位於車籠埔斷層之逆衝斷層、南井位於主斷層下盤，並鄰近中正公園槽溝、新城井設定為新城斷層下盤，鄰近槽溝，三鑽孔皆用以取出覆土層之土樣，進行一般物理特性分析及力學試驗，以求取土層參數。

G. 為提供數值簡化模擬參考，進行竹山槽溝土層分布型態討論。

2. 室內試驗

A. 室內試驗下影響上覆土層斷層跡發展及出露地表的因素，可歸納為斷層構造與上覆土層的影響。

B. 斷層錯動模擬試驗箱及施力設備的設計目標，可以在 80g 的離心飛行中，進行 60

度斷層傾角及不同錯動量的正斷層或逆斷層的離心模擬，斷層的錯動位移以伺服馬達驅動，進行位移控制(Displacement Control)的試驗。

C. 探討變數包含：(1)覆土層厚度；(2)不同種類的上覆土層；(3)不同 g 值；(4)不同基盤的粗糙度及基盤的型態；(5)觀景視窗。

D. 斷層錯動模擬試驗箱已經設計完成，並進行 4 組 1g，1 組高 g 試驗。

3. 數值分析

A. 透過邊界元素法，已可了解斷層上的錯移量會由斷層面的底部，沿斷層面上，往地表面擴展，模擬地震破裂面擴展方式，進而造成地表面變形帶的產生。

B. 由於目前尚缺乏由凝聚力(巨觀參數)轉換成鍵結力(微觀參數)之公式，所以本研究以參數敏感度分析後，討論過 1×10^4(N)、1×10^3(N)、1×10^2(N)建議黏土的鍵結力可以設為 1×10^3 (N)。

參數		砂	黏土
顆粒勁度	Kn(N/m)	5.16×10^6	5.16×10^6
	Ks(N/m)	5.16×10^6	5.16×10^6
Parallel bond 鍵結力(N)		0	1×10^3
摩擦角(度)		30	0
土壤單位重 γ(kN/m^3)		1.57	1.57
土壤與斷盤界面摩擦係數		0.43	0.43

C. 以分離元素法進行數數模擬時，黏土層中的斷層帶可以由追蹤斷鍵位置來判斷，而砂土層的部份則需以染色的顆粒層之彎曲程度來判斷。

D. 黏土覆蓋於砂土上所形成之斷層影響範圍比砂土覆蓋於黏土層上之結果大，且地表之黏土層越厚越明顯；黏土覆蓋於砂土上之模擬在地表形成的抬升崖角度也比較大，地表之黏土層越厚也越明顯。

E. 當斷層傾角較小時，會出現背衝斷層，其現像與研究人員在豐原中正公園所看到的現像一樣。

F. 比對前人的室內實驗結果，可以看到數值模擬之出來的斷層影響範圍較大，但地表的抬升崖角度接近，覆蓋在下面的黏土層之變形也接近，若地表結構物位於自由場實驗中斷層帶出露的圍範裡時，斷層帶會轉向，且有可能出現反向斷層。

第五章、參考文獻

Abdoun, T. H., Ha, D., O'Rourke, M. J., Symans, M. D., O'Rourke, T. D. and Palmer, M.C., (2009), Factors influencing the behavior of buried pipelines subjected to earthquake faulting. *Soil dynamics and earthquake engineering* 29, 415-427.

Ahmed, W. and Bransby, M. F. (2009), Interaction of shallow foundations with reverse faults. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* 135(7), 914-924.

Allmendinger, R. W. (1998), Inverse and forward numerical modeling of trishear fault-propagation folds. *Tectonics* 17, 640-656.

Allmendinger, R. W. and Shaw, J. H. (2000), Estimation of fault propagation distance from fold shape: Implications for earthquake hazard assessment. *Geology* 28, 1099-1102.

Anastasopoulos, I. (2005), Behaviour of foundations over surface fault rupture: Analysis of case histories from the Izmit (1999) earthquake. *Proceedings of the 16th international conference on soil mechanics and geotechnical*, Osaka, Japan, 2623-2626.

Anastasopoulos, I. and Gazetas, G. (2007), Foundation–structure systems over a rupturing normal fault: Part I. Observations after the Kocaeli 1999 earthquake. *Bulletin of earthquake engineering* 5(3), 253-275.

Anastasopoulos, I. and Gazetas, G. (2007), Foundation–structure systems over a rupturing normal fault: Part II. Analysis of the Kocaeli case histories. *Bulletin of earthquake engineering* 5(3), 277-301.

Anastasopoulos, I., Antonakos, G. and Gazetas, G. (2010), Slab foundations subjected to thrust faulting in dry sand: Parametric analysis and simplified desigh method. *Soil dynamics and earthquake engineering* 30, 912-924.

Anastasopoulos, I., Callerio, A., Bransby M. F., Davies, M. C. R., EI Nahas, A., Faccioli, E., Gazetas, G., Masella, A., Paolucci, R., Pecker, A. and Rossignol, E. (2008), Numerical analyses of fault–foundation interaction. *Bulletin of earthquake engineering* 6(4), 645-675.

Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Bransby M. F., Davies, M. C. R. and EI Nahas, A. (2009), Normal fault rupture interaction with strip foundations. *Journal of geotechnical and geoenviromental engineering* 135(3), 359-370.

Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Bransby, M. F., Davies, M. C. R. and EI Nahas, A. (2007), Discussion of "Fault rupture propagation through sand: Finite-element analysis and validation through centrifuge experiments". *Journal of geotechnical and geoenviromental engineering* 133(8), 943-958.

Anastasopoulos, I., Gerolymos, N., Drosos, V., Georgarakos, T., Kourkoulis, R. and Gazetas, G. (2008), Behaviour of deep immersed tunnel under combined normal fault rupture deformation and subsequent seismic shaking. *Bulletin of earthquake engineering* 6(2), 213-239.

Anastasopoulos, I., Gerolymos, N., Gazetas, G. and Bransby, M. F. (2008), Simplified approach for design of raft foundations against fault rupture. Part I: Free-field. *Earthquake engineering and engineering vibration* 7(2), 147-163.

Anastasopoulos, I., Gerolymos, N., Gazetas, G. and Bransby, M. F. (2008), Simplified approach for design of raft foundations against fault rupture. Part II: Soil–structure interaction. *Earthquake engineering and engineering vibration* 7(2), 165-179.

Backblom, G. and Munier, R. (2002), Effects of earthquakes on the deep repository for spent fuel in Sweden based on case studies and preliminary model results. *SKB Technical Report TR-02-24*, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm

Sweden.
Bonilla, M. G. (1982), Evaluation of potential surface faulting and other tectonic deformation. *U.S. Geological Survey*, Open-File Report 82-732.
Borchardt, G. (2010), Establishing appropriate setback widths for active faults. *Environmental and engineering geoscience* 16 (1), 47-53.
Bransby, M. F., Davies M. C. R. and EI Nahas, A. (2008 a), Centrifuge modelling of normal fault-foundation interaction. *Bulletin of earthquake engineering* 6, 585-605.
Bransby, M. F., Davies M. C. R., EI Nahas, A. and Nagaoka, S. (2008 b), Centrifuge modelling of reverse fault-foundation interaction. *Bulletin of earthquake engineering* 6, 607-608.
Bransby, M.F., Davies, M.C.R., & Nahas, A.El. (2008a) "Centrifuge modeling of normal fault-foundation interaction," Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 6, p.585-605.
Bransby, M.F., Davies, M.C.R., & Nahas, A.El. (2008b) "Centrifuge modeling of reverse fault-foundation interaction," Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 6, p.607-628.
Bray, J. D. (1990), The effects of tectonic movements on stresses and deformations in earth embankments. Dissertation doctor of philosophy, University of California, Berkeley.
Bray, J. D., Seed R. B. and Seed, H. B. (1993), 1g Small-scale modeling of saturated cohesive soils. *Geotechnical testing journal* 16(1) 46-53.
Bray, J. D., Seed, R. B., Cluff, L. S. and Seed, H. B. (1994a), Earthquake fault rupture propagation through soil. *Journal of geotechnical engineering* 120, 543-561.
Bray, J. D., Seed, R. B. and Seed, H. B. (1994b), Analysis of earthquake fault ruptures propagation through cohesive soil. *Journal of geotechnical engineering* 120, 562-580.
Bray, J.D. (2001), Developing mitigation measures for the hazards associated with earthquake surface fault rupture. *Proceedings of workshop on seismic fault-induced failures*, Tokyo, 55-80.
Bray, J.D. and Kelson, K. I. (2006), Observations of surface fault rupture from the 1906 earthquake in the context of current practice. *Earthquake spectra* 22, S69-S89.
Bryant, W. A. (2010), History of the alquist-priolo earthquake fault zoing act, California, USA. *Environmental and engineering geoscience*, 16(1), 7-18.
Bull. Seismol. Soc. Am., 75, 1135 – 1154.
Burns, J. Q. and Richard, R. M. (1964), Attenuation of stresses for buried cylinders. *Proceedings of symposium on soil-structure interaction, Tucson*, 378-392.
Burridge, P. B., Scott, R. F. and Hall, J. F. (1989), Centrifuge study of faulting effects on tunnel. *Journal of geotechnical engineering*, *ASCE* 115 (7), 949-967.
California Integrated Waste Management Board (2002), Landfill facility compliance study: Checklist of pertinent environmental regulatory requirements: Sacramento, Ca, Publication 520-02-002, 105.
Cardozo, N., Bhalla, K., Zehnder, A.T. and Allmendinger, R.W. (2003), Mechanical models of fault propagation folds and comparison to the trishear kinematic model. *Journal of structural geology* 25, 1-18.
Champion, J., Mueller, K., Tate, A. and Guccione., M. (2001), Geometry, numerical models and revised slip rate for the Reelfoot fault and trishear fault-propagation fold, New Madrid seismic zone. *Engineering geology* 62, 31-49.
Chan, Y. C., Chen, Y. G., Shih, T. Y., and Huang, C. (2007), Characterizing the hsincheng active fault in northern Taiwan using airborne LiDAR data: Detailed geomorphic

features and their structure implications. *Journal of asian earth sciences* 31, 303-316.
Chang, S.L., (1972) Subsurface geologic study of the Hsinchu basin, Taiwan, Petrol. Geol. of Taiwan, no. 10, 63-87.
Chen J.S., (1974) Seismic study of the Paoshan Structure, Hsinchu, Taiwan, Petroleum Geology of Taiwan, no.11, pp.183-195.
Chen, H.T., C.J. Lee, and Chen, W.H. (1998) "The traveling pluviation apparatus for sand specimen preparation," *Proceedings of the International Conference Centrifuge 98*, Tokyo, pp.143-148 .
Chen, J. S. (1974), Seismic study of the Paoshan structure, Hsinchu, Taiwan, Petrol. Geol. Taiwan, no.11, 183-195.
Chen, W. S., et al. (2007), Late Holocene paleoseismicity of the southern part of the Chelungpu Fault in central Taiwan: Evidence from the Chushan excavation site, Bull. Seismol. Soc. Am., 97(1b), 1 – 13, doi:10.1785/0120050161.
Chen, W. S., Huang, B. S., Chen, Y. G., Lee, Y. H., Yang, C. N., Lo, C. H., Chang, H. C., Sung, Q. C., Hiang, N. W., Lin, C. C., Sung, S. H. and Lee, K. J. (2001), 1999 Chi-Chi earthquake: A case study on the role of thrust-ramp structures for generating earthquakes. *Bulletin seismological of america* 91, 986-994.
Chen, W.S., Lee, K.j., Lee, L.S., Ponti, D. J., Prentice, C., Chen, Y.G., Chang, H.C. and Lee, Y.H. (2004), Slip rate and recurrence interval of the Chelungpu Fault during the past 1900 years. *Quaternary international* 115, 167-176.
Chen, Y.G., J. Bruce H. Shyu, Yoko Ota, Chen, W.S., Hu, J.C., Tsai, B.W., Wang, Y., (2004) Active structure as deduced from geomorphic features: a case in Hsinchu Area, northwestern Taiwan, Quaternary International, 115-116, 189-199.
Chung, C. T. (1963), A study of the Geology and Petroleum Potentialities of the Paoshan and Chingtsohu Area, Hsinchu, Petrol. Geol. Taiwan, no.2, 221-240.
Cluff, L. S. (2002), Earthquake faults and their implications to earthquake engineering and seismic safety. 中興工程科技研究發展基金會邀請講席演講會，會議光碟資料。
Cluff, L. S., Page, R. A., Slemmons, D. B. and Crouse, C. B. (2003), Seismic hazard exposure for the Trans-Alaska pipeline. Proceedings of the 6th U.S. conference and workshop on lifeline earthquake engineering, American society of civil engineers, *Technical council on lifeline earthquake engineering*, Monograph 25, 535–546.
Cole D. A. and Lade, P. V. (1984), Influence zones in alluvium over dip-slip faults. *Journal of geotechnical engineering* 110, 599-615.
Coppersmith, K. J. and Youngs R. R. (2000), Data needs for probabilistic fault displacement hazard analysis. *Journal of geodynamicsm* 29, 329-343.
Dar, S. M. and Bates, R. C. (1974), Stresses analysis of hollow cyclinderical inclusions. *Journal of the geotechnical engineering division, ASCE* 100, GT2, 123-138.
Davie, J. R. (1973), Behavior of cohesive soils under uplift forces. Dissertation doctor of philosophy, University of Glasgow, Scotland.
Dong, J. J., Wang, C. D., Lee, C. T., Liao, J. J. and Pan, Y. W. (2003), The influence of surface ruptures on building damage in 1999 Chi- Chi earthquake: A case study in Fengyuan city. *Engineering geology* 71, 157-179.
Donmez, C. and Pujol, S. (2005), Spatial distribution of damage caused by the 1999 earthquakes in Turkey. *Earthquake spectra* 21(1), 53-69.
Duncan, J. M. and Chang, C. Y. (1970), Nonlinear analysis of stress and strain in soils. *Journal of soil mechanics and foundation division, ASCE*, 96, SM5, 1629-1653.
Duncan, J. M. and Lefebvre, G. (1973), Earth pressures on structures due to fault movement.

Journal of Soil mechanics and foundation division, ASCE 99 SM12, 1153-1163.
Einstein, H. H. and Schwartz, C. W. (1979), Simplified analysis for tunnel supports. *Journal of the geotechnical engineering division, ASCE*, GT4, 499-518.
Erickson, S. G., Strayer, L. M. and Suppe, J. (2001), Initiation and reactivation of faults during movement over a thrust-fault ramp numerical mechanical models. *Journal of structural geology* 23, 11-23.
Erslev, E. A. (1991), Trishear fault-propagation folding. *Geology* 19, 617-620.
Faccioli, F., Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Callerio, A. and Paolucci, R. (2008), Fault rupture–foundation interaction: selected case histories. *Bulletin of earthquake engineering*, 6(4), 557-583.
Finch, E., Hardy, S. and Gawthorpe, R. (2003). Discrete element modelling of contractional fault-propagation folding above rigid basement fault blocks. *Journal of structural geology* 25, 515-528.
Friedman, M., Hugman, R. H. H. III and Handin, J. (1980), Experimental folding of rocks under confining pressure, part VIII—forced folding of unconsolidated sand and lubricated layers of limestone and sandstone. *The geological society of america bulletin* 91, 307-312.
Gazetas, G., Pecker, A., Faccioli, F. and Paolucci, R. (2008), Preliminary design recommendations for dip-slip fault-foundation interaction. *Bulletin of earthquake engineering* 6(4), 677-687.
Gilbert, G. K., Humphrey, R. L., Sewell, J. S. and Soule, F., (1907), The San Francisco earthquake and fire of April 18, 1906 and their effects on structures and structural materials. *U.S. Geol. Surv. Bull. 324*, Washington, D.C.
Ha, D., Abdounb, T. H., O'Rourkeb, M. J., Symansb, M. D., O'Rourkec, T. D., Palmerc, M. C. and Stewartc, H. E. (2010), Earthquake faulting effects on buried pipelines - case history and centrifuge study journal of earthquake engineering. *Journal of earthquake engineering* 14(5), 646-669.
Ha, D., Abdounb, T. H., O'Rourkeb, M. J., Symansb, M. D., O'Rourkec, T. D. and Palmerc, M. C. (2008), Buried high-density polyethylene pipelines subjected to normal and strike-slip faulting—a centrifuge investigation. *Canadian geotechnical journal* 45, 1733-1742.
Ha, D., Abdounb, T. H., O'Rourkeb, M. J., Symansb, M. D., O'Rourkec, T. D. and Palmerc, M. C. (2008), Centrifuge modeling of earthquake effects on buried high-density polyethylene (HDPE) pipelines crossing fault zones. *ASCE Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* 134(10), 1501-1515.
Hibbitt, Karlsson, Sorensen, Inc (2004), ABAQUS/CAE User's Manual, Version 6.4-3.
Honegger, D. G., Nyman, D. J., Johnson, E. R., Cluff, L. S. and Sorensen, S. P. (2004), Trans-Alaska pipeline system performance in the 2002 Denali fault, Alaska, earthquake. *Earthquake spectra* 20(3), 707-738.
Hsu, T.L. and Chang, H.C., (1979) Quaternary faulting in Taiwan. Mem. Geol. Soc. China, no. 3, p. 155-165.
Huang, C.S., (1984) Quaternary faults in the coastal area between Hsinchu and Chunan, northwestern Taiwan, Special Publication of the Central Geological Survey, no. 3, 103-126.
Huang, W. J. (2006), Deformation at the leading edge of thrust faults, Ph.D. dissertation, Purdue University in West Lafayette, Indiana, July.

Huang, W. J. (2006), Deformation at the leading edge of thrust faults, Ph.D.dissertation, 435 pp., Purdue Univ., West Lafayette, Indiana, July.

Huang, W. J. and Johnson A. M. (2010), Quantitative description and analysis of earthquake-induced deformation zones along strike-slip and dip-slip faults. *J. Geophys*. Res. 115, B03408.

Huang, W. J., Johnson, A. M., Chen, W. S., Lee, Y. H. and Yang, C. C. (2009), Monoclinal and parabolic profiles of the Chi-Chi thrust termination. *Journal of Structural Geology (submitting)*

Huang, W.-J., and A. M. Johnson (2010), Quantitative description and analysis of earthquake-induced deformation zonesalong strike-slip and dip-slip faults, J. Geophys. Res., 115, B03408, doi:10.1029/2009JB006361.

I. T. A. Working Group on general approaches to the design of tunnels. (2000), Guidelines for the design of the shield tunnel lining. *Tunnelling and Underground Space Technology* 15, 303-331.

James P. McCalpin (1996), Paleoseismology, Elsevier, 588.

James P. McCalpin (2009), Paleoseismology (2nd Edition), Academic Press, 613.

Johansson, J. and Konagai, K. (2004), Fault surface rupture experiments: a comparison of dry and saturated soils. *Proceeding of 27th Symposium on earthquake engineering, JSCE*, 271

Johansson, J. and Konagai, K. (2006), Fault induced permanent ground deformations—an experimental comparison of wet and dry soil and implications for buried structures. *Soil dynamics and earthquake engineering* 26(1), 45-53.

Johansson, J. and Konagai, K. (2007), Fault induced permanent ground deformations: experimental verification of wet and dry soil, numerical findings' relation to field observations of tunnel damage and implications for design. *Soil dynamics and earthquake engineering* 27(10), 938-956

Johnson, A. M., Fleming, R. W.and Cruikshank K. M. (1994b), Shear zones formed along long, straight traces of fault zones during the 28 June 1992 Landers, California, Earthquake. *Bulletin of the seismological society of america* 84(3), 499-510.

Johnson, A. M., K. M. Johnson, J. Durdella, M. Sözen, and T. Gür (2002), An emendation of elastic rebound theory: Main rupture and adjacent belt of right–lateral distortion detected by viaduct at Kaynasli, Turkey 12 November 1999 Duzce earthquake, *Journal of Seismology, 6*, 329–346.

Johnson, A.M. and Fletcher, R.F. (1994a), Folding of viscous layers. Columbia University Press, New York, 461.

Johnson, K. M. and Arvid, M. Johnson (2002a), Mechanical analysis of the geometry of forced folds. *Journal of structural geology* 24, 401-410.

Johnson, K. M. and Arvid, M. Johnson (2002b), Mechanical models of trishear-like folds. *Journal of structural geology* 24, 277-287.

Johnson, K. M., Y. J. Hsu, P. Segall, and S. B. Yu (2001), Fault geometry and slip distribution of the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake imaged from inversion of GPS data, Geophys. Res. Lett., 28(11), 2285–2288, doi:10.1029/2000GL012761.

Kao, H., and W. P. Chen (2000), The Chi-Chi earthquake sequence: Active, out-of-sequence thrust faulting in Taiwan, Science, 288, 2346 – 2349, doi:10.1126/science.288.5475.2346.

Karamitros, D. K., Bouckovalas, G. D. and Kouretzis, G. P. (2007), Stress analysis of buried steel pipelines at strike-slip fault crossings. *Soil dynamics and earthquake engineering*

27(3), 200-211.
Kawashima, K. (2002), Damage of bridges resulting from fault rupture in the 1999 Kocaeli and Duzce, Turkey earthquakes and the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake. *Proceedings of sructural engineering and earthquake engineering (Special Issue), JSCE* 19(2), 179s-197s.
Kelson, K. I., Kang, K. H., Page, W. D., Lee, C. T. and 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 seismolgical society america* 91(5), 930-952.
Kennedy, R.P., Chow, A. W. and Williamson, R. A. (1977), Fault movement effects on buried oil pipeline. *Transportation engineering journal*, *ASCE* 103(5), 617-633.
Konagai K., Fujita T., Ikeda T. and Takatsu S. (2009), Tectonic deformation buildup in folded mountain terrains in the October 23rd, 2004 Mid-Niigata Earthquake. *Soil dynamics and earthquake engineering* 29(2), 261-267.
Konagai, K. (2005), Data archives of seismic fault induced damage. *Journal of soil dynamics and earthquake engineering* 25, 559-570.
Konagai, K. ed. (2001), 1st Workshop on Seismic Fault-induced Failures- Possible Remedies for Damage to Urban Facilities, Tokyo, Japan. http://shake.iis.u-tokyo.ac.jp/seismic-fault/
Konagai, K. ed. (2003), JSCE/Eq AP Workshop on Seismic Fault-induced Failures- Possible Remedies for Damage to Urban Facilities, Tokyo, Japan. http://shake.iis.u-tokyo.ac.jp/seismic-fault/
Kontogianni, V. A. and Stiros, S. C. (2003), Earthquakes and seismic faulting: Effects on tunnels. *Turkish journal of earth sciences* 12, 153-156.
Ku, C. C., (1963) Photogeologic study of terraces in northwestern Taiwan, Memoir of the Geological Society of China, no. 6, 89-92.
Kulhawy, F.H. and Mayne, P.W. (1990), Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design. EPRI Report, Cornell University, Ithaca, New York
Kung, C. S., Ni, W. P. and Chiang, Y. J. (2001), The damage and rehabilitation work of Shih-Kang Dam. *Proceedings of workshop on seismic fault-induced failures*, Tokyo, 33–48.
Lade P. V., Cole D. A. and Cummings, D. (1984), Multiple failure surfaces over dip-slip faults. *Journal of geotechnical engineering* 110, 616-627.
Lawson, A. C. (1908), The California earthquake of April 18, 1906. Report of the state earthquake investigations commission, *Carnegie institute of washington publication* 87(1), 451.
Lazarte, C. A, Bray, J. D., Johnson, A. M. and Lemmer, R. E. (1994), Surface breakage of the 1992 Landers earthquake and its effects on structures. *Bulletin of the seismological society of america* 84(3), 547-561.
Lazarte, C. A. (1996), The response of earth structures to surface fault rupture. Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, Univ. of California, Berkeley.
Lazarte, C. A. and Bray, J. D. (1996), A study of strike–slip faulting using small- scale models. *Journal of geotechnical testing* 19, 118-129.
Lee, J. C., Chen, Y. G., Sieh, K., Mueller, K., Chen, W. S., Chu, H. T., Chan, Y. C., Rubin, C. and Yeats, R. (2001), A vertical exposure of the 1999 surface rupture of the Chelungpu fault at Wufeng, western Taiwan: Structural and paleoseismic implications for an active thrust fault. *Bulletin seismological of america* 91(5), 914-929.
Lee, J. C., Rubin, M. C., Mueller, K., Chen, Y. G., Chan, Y. C., Sieh, K., Chu, H. T. and Chen, W. S. (2004), Quantitative analysis of movement along an earthquake thrust scarp: A

case study of a vertical exposure of the 1999 surface rupture of the Chelungpu fault at Wufeng, western Taiwan. *Journal of asian earthquake science* 23, 263-273.

Lee, J.W., Hamada, M., Tabuchi, G. & Suzuki, K. (2004) "Prediction of fault rupture propagation based on physical model tests in sandy soil deposit," 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canda, Paper No. 119.

Lee, J.W., Tabuchi, G. and Hamada, M. (2003), Experimental approach for understanding of fault rupture propagation through an alluvial soil. *JSCE Journal of earthquake engineering* 27.

Lee, K. M., Hou, X. Y., Ge1, X. W. and Tang, Y. (2001), An analytical solution for a jointed shield-driven tunnel lining. *Journal of numerical and analytical methods in geomechanics* 25, 365-390.

Lee, W. J. and Hamada, M. (2005), An experimental study on earthquake fault rupture propagation through a sandy soil deposit. *Journal of structure eng./ earthquake eng.*, JSCE 22, 1s-13s.

Lettis W., Bachhuber, J., Witter, R., Barka, A., Bray, J., Page, W. and Swan, F. (2000), Surface fault rupture, in Kocaeli, Turkey, Earthquake of August 17, 1999 reconnaissance report. *Earthquake spectra* 16, 11-53.

Li et al., (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.

Lin et al., (2009) "Aiming Lin, Zhikun Ren, Dong Jia and Xiaojun Wu, Co-seismic thrusting rupture and slip distribution produced by the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake, China". *Tectonophysics* 471 (3–4) , pp. 203–215.

Lin, M.L, Chung C.F., & Jeng F.S. (2006) "Deformation of overburden soil induced by thrust fault slip," Engineering Geology, Vol. 88, p.70-89.

Lin, M.L., Chung, C.F., Jeng, F.S. and Yao, T.C. (2007a), The deformation of overburden soil induced by thrust faulting and its impact on underground tunnels. *Engineering geology* 92, 110-132

Lin, M.L., Wang, C.P., Chen, W.S., Yang, C.N. and Jeng, F.S. (2007b), Inference of trishear-faulting processes from deformed pregrowth and growth strata. *Journal of structural geology* 29, 1267-1280

Malvern, L. E. (1965), *Introduction to the mechanics of a continuous Medium,* 713 pp, Prentice–Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Moh, Z. C. and Woo, S. M. (1990), Geotechnical characteristic of soils in the Taipei Basin. *Proceedings of 10th Southeast Asia Geotechnical Conference*, Taipei, Taiwan.

Moosavi, S.M., Jafari, M.K., Kamalian, M. & Shafiee (2010) "Experimental investigation of reverse fault rupture – rigid shallow foundation interaction," International Journal of Civil Engineering, Vol. 8, No.2, p. 85-98.

Muir Wood, A. M. (1975), The circular tunnel in elastic ground. *Geotechnique* 25, 115-127.

Murbach, D., Rockwell, T. K. and Bray, J. D. (1999), The relationship of foundation deformation to surface and near-surface faulting resulting from the 1992 Landers earthquake. *Earthquake spectra* 15(1), 121-144.

Nahas, A. El., Bransby, M. F. and Davies, M. C. R. (2006), Interaction between normal fault rupture and rigid strong raft. *Proceedings of international conference on physical modelling in geotechnics*, Hong Kong, August 2006. 337-342.

Newmark, N, M. and Hall, W. J. (1976), Pipeline design to resist large fault displacement. Proceedings of the U. S. Coference on Earthquake Engineering, Universisty of Michigan,

Ann Arbor, Michigan, 416-425.
Niccum, M. R., Cluff, L. S., Chamorro, F. and Wyllie, L. (1976), Banco centtral de Nicaragua: A case history of a high-rise building that survived surface fault rupture in Engineering geology and Soils engineering symposium, edit by C. B. Humphrey, No 14, Idaho Transportation Department, Division of Highways, Boise, ID, 635-648.
Nino, F., Philip, H. and Chery, J. (1998), The role of bed-parallel slip in the formation of blind thrust faults. *Journal of structural geology* 20(5), 503-516.
O'Rourke, T. D. (2010), Geohazards and large, geographically distributed systems. *Ge´otechnique* 60(7), 505-543.
Ohya, S., Imai, T., and Matsubara, M. (1982) "Relationships between N value by SPT and LLT Pressuremeter Results", *Proceedings, 2nd European Symposium on Penetration Testing*, Vol.1, Amsterdam, pp125-130
Okada, Y. (1985), Surface deformation to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 75, 1135-1154.
Okada, Y. (1992), Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bull. Seismol. Soc. Am., 82, 1018–1040.
Ota, Y., Chen, Y. G. and Chen, W. S. (2005), Review of paleoseismological and active fault studies in Taiwan in the light of the Chichi earthquake of September 21, 1999. *Tectonophysics* 408, 63-77.
Oyama, Y. and Tani, K. (2003), Analysis of shear band structure developed on surface of sand layer observed in strike sip fault model tests. *Totsorl shear appara sans and fouons* 28(2), 95.
Pamuk, K., Kalkan, E. and Ling, H.I. (2005), Structure and geotechnical impacts of surface rupture on highway structures during recent earthquakes in Turkey. *Soil dynamics and earthquake engineering* 25, 581-589.
Prentice, C. S. and Ponti, D. J. (1997), Coseismic deformation of the Wrights tunnel during the 1906 San Francisco earthquake: A key to understanding 1906 fault slip and 1989 surface ruptures in the southern Santa Cruz mountains 102(B1), 635-648.
Ranken, R.E., Ghaboussi, J. and Hendron, A. J. JR. (1978), Analysis of ground-liner interaction for tunnels. Report No. UMTA-IL-06-0043-78-3, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C.
Reid, H. F. (1910), Report of the state earthquake investigation commission, II: The mechanics of the earthquake. Carnegie institution of washington, washington, D. C., 192.
Romero, N., O'Rourke, T. D., Nozick, L. K. and Davis, C. R. (2010), Seismic hazards and water supply performance. *J. Earthquake engng* 14(7), 1022-1043.
Roth, W. H., Scott, R. F. and Austin, I. (1981), Centrifuge modeling of fault propagation through alluvial soils. *Geophysical research letters* 8(6), 561-564.
Roth, W. H., Sweet, J. and Goodman, R. E. (1982), Numerical and physical modeling of flexural slip phenomena and potential for fault movement. *Rock mechanic* 12, 27-64.
Scott, R. F. and Schoustra, J. J. (1974), Nuclear power plant sitting on deep alluvium. *Journal of the geotechnical engineering division*, ASCE, 100, GT4, 449-459.
Sexton, C. J. (2008), Implementing the California earthquake fault zoning act: A Proposal for Change. *Environmental and Engineering Geoscience*, 14(1), 43-51.
Sexton, C. J. and Blake, T. F. (2010), Challenges in peer review of fault-rupture hazard studies for engineering mitigation. *Environmental and Engineering Geoscience*, 16 (1), 41-46.

Shearad, J. L., Cluff, L. S. and Allen, C. R. (1974), Potentially active faults in the dam foundation. *Geotechnique* 24(3), 367-428.

Sorensen, P. S. and Meyer, J. K. (2003), Effect of the denali fault rupture on the trans-alaska pipeline. proceeding of the 6th US, conference and workshop on the lifeline earthquake engineering, American society of civil engineers, Technical council on lifeline earthquake engineering, *Monograph* 25, 547-555.

Stone, K.J.L. & Wood, D.M. (1992) "Effects of dilatancy and particle size observed in model tests on sand," Soils and Foundations, Vol. 32, No.4, p.43-57.

Takada, S, Hassani, N. and Fukuda, K. (2001), A new proposal for simplified design of buried steel pipes crossing active faults. *Earthquake engineering and structural dynamics* 30, 1243-1257.

Tang, C. H. (1968), Photogeological observation on the low hilly terrain and coastal plain area of Hsinchu, Taiwan, Petrol. Geol. Taiwan, no.4, 35-52.

Tang, C.H. and Hsu, C.H., (1970) Subsurface geology and petroleum deposits in the Hsinchu area, Petrol. Geol. Taiwan, no. 7, 89-101.

Tani, K., Ueta K., & Onizuka, N. (1996) Discussion on "Earthquake fault rupture propagation through soil" by Bray, J.D., Seed, R.B.,Cluff, L.S. & Seed, H.B., Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 122, No.1, p.80-82.

Tani, K., Ueta, K. and Onizuka, N. (1994), Scale effect of Quaternary ground deformation observed in model tests of vertical fault. *Proceeding of 29th Japan National Conference on SMFE*, 1359-1362.

Tani, K., Ueta, K. and Onizuka, N. (1996), Discussion on "Earthquake fault rupture propagation through soil" by J.D. Bray, R.B. Seed, L.S. Cluff and H.B.Seed, *Journal of geotechnical engineering, ASCE*, 122(1), 80-82.

Trautmann, C. H. and O'Rourke, T. D. (1985), Lateral force–displacement response of buried pipe. *Journal of geotechnical engineering* 111(9), 1077–1092.

Trautmann, C. H., O'Rourke, T. D. and Kulhawy, F. H. (1985), Uplift force–displacement response of buried pipe. *Journal of geotcechnical engineering* 111(9), 1061–1076.

Treiman JA (2010), Fault rupture and surface deformation: Defining the hazard. environmental and engineering geoscience 16 (1), 19-30.

Ulusay, R., Aydan, R. and Hamada, M. (2001), The behaviour of structure built on active fault zones: Examples from the recent earthquakes of Turkey. *Proceeding of workshop on seismic fault-induced* Failures, Tokyo, 1-26.

Wang, C.Y., Yang, R.K., Tsai, D.T., (1992) Shallow reflection seismic using firecrackers as the source II: field experiments, TAO, vol. 2, no. 3, 163-185.

Wang, L. R. L. and Yeh, Y. (1985), A refined seismic analysis and design of buried pipeline for fault movement. *Earthquake engineering structure dynamics* 13, 75–96.

Wang, W. L., Wang, T. T., Su, J. J., Lin, C. H. and Seng, C. R. (2001), Assessment of damages in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi earthquake. *Tunnels and undergound space* 16(3), 133–150.

Wells, D. L. and Coppersmith, K. J. (1994), New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bull. Seism. Soc. Am., 84, 974-1002.

Wells, D. W. and Coppersmith, K. J. (1994), New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the seismological society of america* 84, 974-1002.

Withjack, M.O., Olson, J. and Peterson, E. (1990), Experimental models of extensional

forced folds. *The american association of petroleum geologists bulletin* 74(7), 1038-1054.

Yang, K.M., Wu, J.C., Ting, H.H., Wang, J.B. and Chi, W.R., (1994) Sequential deformation in foothills belt, Hsinchu and Miaoli areas: Implications in hydrocarbon accumulation, Petrol. Geol. Taiwan, no. 29, 47-74.

Yang, K.M., Wu, J.C., Wickham, J.S., Ting, H.H., Wang, J.B. and Chi, W.R., (1996) Transverse structures in Hsinchu and Miaoli areas: Structural model and evolution in the foothills belt, northwestern Taiwan: Petrol. Geol. Taiwan, no. 30, 111-150.

Yieh, Y. H. and Liaw, T. C. (1985), Design consideration for pipelines buried through fault zone. *Proceeding of the trilateral seminar-workshop on lifeline earthquake engineering*, Taipei, Taiwan, 309-316.

Yilmaz, M. T. and Paolucci, R. (2007), Earthquake fault rupture-shallow foundation interaction in undrained soils: A simplified analytical approach. *Earthquake engineering and structural dynamics* 36(1), 101-118.

Youngs, R. R. (2003), A methodology for Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis (PFDHA). *Earthquake Spectra* 19, 191-219.

Zehnder, A. T. and Allmendinger, R. W. (2000), Velocity field for the trishear model. *Journal of structural geology* 22, 1009-1014.

丹桂之助（1933）臺灣新竹州竹東台地之地形考察。地學雜誌，46 卷，536 期，35-43 頁。（日文）；

王建智 (1997)，隧道環片襯砌分析方法之探討，地工技術，第 60 期，第 57-64 頁。

王乾盈、孫志財 (1999)，台北盆地震測地層解釋，經濟部中央地質調查所特刊，第 11 號，第 273-292 頁。

王景平 (2002)，地表單斜皺摺與盲斷層之幾何關係探討，國立台灣大學土木工程研究所碩士論文，台北。

石再添、鄧國雄、張瑞津、楊貴三（1985）竹東台地的活斷層與地形面。國立台灣師範大學地理研究所研究報告，第 12 期，1-44 頁。

石同生、林偉雄、李元希、盧詩丁、林燕慧、劉彥求、黃存慧、林啟文（2002）活動斷層調查報告：新城斷層。經濟部中央地質調查所施政計劃報告，網路版。

石瑞銓、陳文山、林啟文 (2003) 新竹東方新城斷層之 P 波與 SH 波淺層震測調查。經濟部中央地質調查所特刊，第 14 號，1~9 頁。

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

何泰源，陳卓然，陳勝福 (2003)，潛盾隧道襯砌環片與土壤互制行為之探討，地工技術，第 97 期，第 77-86 頁。

余水倍, 郭隆晨, 陳宏宇（1997）全球定位衛星觀測之台灣現今地殼運動：第十六屆測量學術及應用研討會論文集，中壢，臺灣，1-7。

余水倍、陳宏宇、郭隆晨、侯進雄、李錦發 (1999)，台北盆地斷層活動之觀測研究，經濟部中央地質調查所特刊，第 11 號，第 227-251 頁。

李元希、石同生、盧詩丁、林燕慧、林偉雄（2002）新城斷層與新竹斷層活動性研究，台灣之第四紀第九次研討會論文集，第 12-15 頁。

李元希、吳維毓、石同生、盧詩丁 (2000)，九二一集集地震地表變形特性-埤豐橋以東，經濟部中央地質調查所特刊，第 12 號，第 19-40 頁。

李正兆、張瑞誠、陳斗生 (1999)，台北斷層調查－南港某工址現地調查為例，經濟部中央地質調查所特刊，第 11 號，第 181-205 頁。

李崇正 (2003)，模型試驗在大地工程教學的應用，土木水利，第 30 卷，第 4 期，第 89-92 頁。
李崇正、陳慧慈、魏雨辰、鄺伯軒、連紘震、洪汶宜、何泰源、吳文隆 (2010)，以離心模型振動台試驗模擬砂土層液化行為，地工技術，第 125 期，第 95-104 頁。
李錫堤 (2001)，台北都會區活斷層與地震災害潛勢，台北都會區地質災害研討會論文集，第 4.1-4.19 頁，台北。
李錫堤 (2001)，車籠埔斷層 HQ 連續取樣工程地質調查鑽探工作報告，國立中央大學應用地質研究所印製，共 44 頁。
李錫堤、康耿豪、鄭錦桐、廖啟雯 (2000)，921 集集大地震之地表破裂及地盤變形現象，地工技術，第 81 期，第 5-16 頁。
亞新工程顧問公司 (1992a)，台北都會區大眾捷運系統信義線大地工程分析與建議報告，台北。
亞新工程顧問公司 (1992b)，台北都會區大眾捷運系統信義線地質與土壤工程性質調查報告，台北。
亞新工程顧問公司 (2003)，台北都會區大眾捷運系統信義線 DR148 設計標技術服務建議書，台北。
周坤賢 (1998)，模型樁貫入砂土之行為及分析，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文，台北。
林呈，孫洪福 (2000)，見證 921 集集大地震-震害成因與因應對策(上冊)，台北。
林啟文、盧詩丁、石同生、陳致言、林燕慧(2007) 台灣北部的活動斷層-二萬五千分之一台灣活動斷層分布圖說明書。經濟部中央地質調查所特刊，第 19 號，共 129 頁。
林啟文、鐘瑋、侯進雄(2005) 台灣北部新城斷層與新竹斷層的一些構造特性。經濟部中央地質調查所特刊，第 16 號，41~54 頁。
林朝宗 (2001)，台北都會區地質環境，台北都會區地質災害研討會論文集，第 1-1 頁-第 1-19 頁，台北。
林朝宗，李錦發 (1997)，從鉆井資料看台北斷層在台北盆地的位置及其活動性，地工技術，第 64 期，第 79-92 頁。
林銘郎、鄭富書、王鴻基、王景平、鍾春富、張芳銘、蔡維哲、許永欣、黃俊傑 (2004)，台北斷層引致之上覆土層變形及其對潛盾隧道之影響，嚴慶齡工業研究中心研究報告，亞新工程顧問公司委託。
紀宗吉、邱禎龍、李元希、劉桓吉 (2000)，車籠埔地震斷層沿線地表變致災案例探討，經濟部中央地質特刊，第 12 號，第 235-254 頁。
胡玉燕(2005)以淺層反射震測探測新城斷層地下構造，國立中央大學，地球物理研究所，碩士論文，第 36 頁。
康耿豪 (2004)，921 集集地震造成之地表變形模式，國立中央大學應用地質研究所碩士論文，桃園。
張國楨 (1998)，台灣西部基盤高區對鄰主要新構造影響之三維模擬，國立台灣大學地質學研究所碩士論文，台北。
張徽正、林啟文、陳勉銘、盧詩丁(1998)台灣活動斷層概論並-五十萬分之一台灣活動斷層分布圖說明書。經濟部中央地質調查所特刊，第 10 號，共 103 頁。
粘為東 (2010)，以 PFC2D 模擬砂土直剪實驗中之剪動帶及應用之研究，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文，台北。

許恒誌 (2004)，盲逆衝斷層活動時上覆土層內破裂擴展行為與變形區範圍之研究，國立臺灣大學土木工程學研究所碩士論文，台北。
連永旺 (2000)，大地裂痕—空中鳥瞰車籠埔斷層，飛虎文化事業有限公司，台北，第 11 頁。
陳文山 (1992)，新竹科學園區活動斷層地震地質學研究，行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告(NSC91-2119-M002-010)。
陳文山、陳于高、劉聰桂、黃能偉 (2000b)，九二一集集大地震的斷層特性與構造意義。經濟部中央地質調查所特刊，第 12 號，第 139-154 頁。
陳文山、陳于高、劉聰桂、黃能偉、林清正、宋時驊、李昆杰 (2000a)，九二一集集大地震的地震斷層特性與構造意義。經濟部中央地質調查所特刊，第 12 號，第 139-154 頁。
陳文山、劉力豪、顏一勤、楊小青、李龍昇、游能悌、張徽正、石瑞銓、李元希、林偉雄、石同生（2003）新城斷層的古地震研究，經濟部中央地調所特刊，第十四號，第 11-23 頁。
陳文政、朱傚祖、賴典章 (2000)，石岡壩地區之地震斷層，經濟部中央地質調查所特刊，第 12 號，第 41-62 頁。
陳伯毅 (2004)，電阻率剖面與槽溝剖面之對比研究，國立中央大學地球物理研究所碩士論文，中壢。
陳建華 (2001)，橫移壓縮作用引致地質變形機制初探，碩士論文，國立台灣大學土木工程研究所，台北。
鳥居敬造、吉田要（ 1931）新竹州苗栗及竹東油田調查報告。臺灣總督府殖產局，第 585 號， 共 81 頁。
游明聖、蕭謙麗(1997) 新城斷層的地質特徵，中國地球物理學會八十六年度年會及學術研討會論文集，第 379-382 頁。
黃文正、陳致言、劉思妤、林燕慧 (2000)，台灣中部大甲溪至頭汴坑溪九二一集集地震地表變形模式。經濟部中央地質調查所特刊，第 12 號，第 63-87 頁。
黃鑑水、劉桓吉、何信昌 (1984) 新竹-竹南地區斷層之研究。經濟部中央地質調查所特刊，第 3 號，103~126 頁。
塗明寬、陳文政(1990)中壢圖幅及說明書，五萬分之一台灣地質圖。經濟部中央地質調查所，共 53 頁。
楊耿明、黃旭燦、吳榮章、丁信修、梅文威、徐祥宏（2002）台灣陸上斷層帶地質構造與地殼變形調查研究（3/5）西北部新城斷層附近地區。經濟部中央地質調查所報告第 91-4 號。
楊貴三、蔡怡真（2003）臺灣北部新竹與新城斷層之地形學研究。經濟部中央地調所特刊，第十四號，第 25-35 頁。
楊潔豪、郭泰融（1991）新城斷層之地球物理研究。第三屆臺灣地區地球物理研討會論文集，337-352 頁。
經濟部中央地質調查所 (2001)，新期構造、古地震與槽溝開挖研究(上)，斷層活動性調查九十年度報告，台北。
經濟部中央地質調查所 (2011a)，易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置—集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估計畫(1/3)，台北。
經濟部中央地質調查所 (2011b)，100 年度旗山斷層補充地質調查案，台北。

劉守華、董津城、徐光明、蔡正銀 (2005)「地下斷裂對不同土質上覆土層的工程影響，」岩石力學與工程學報，Vol. 24, No.11, p.1868-1874。
蔡承璋 (2003)，活動斷層帶限制發展處理機制與策略評估之研究，國立台北科技大學建築與都市設計研究所碩士論文，台北。
蔣佳興 (2006)，正斷層錯移引致上覆土層變形行為之探討，國立臺灣大學土木工程學研究所碩士論文，台北。
盧詩丁、石同生、林啟文、黃文正、陳華玫、李元希、陳致言、張徽生（2000）臺灣北部新竹地區活動斷層調查。中國地質學會 89 年年會論文集，308-310 頁。
鍾春富 (2007)，逆斷層錯動引致上覆土層變形行為及對結構物影響之研究，國立臺灣大學土木工程學研究所博士論文，台北。
鍾春富，林銘郎 (2004)，機率式斷層位移危害度分析初探，岩盤工程研討會論文集，第 216-213 頁，淡水。
鍾春富，林銘郎 (2006)，機率式斷層位移危害度分析-以山腳斷層為例，岩盤工程研討會論文集，第 631-640 頁，台南。
鍾春富、林銘郎、鄭富書、王景平、姚大鈞 (2005)，逆斷層斷盤錯動引致上覆土層變形行為探討，經濟部中央地質調查所特刊，第 16 號，第 109-123 頁。
簡文鏜 (1996)，以離心模型模擬地質構照演變研究，國立臺灣大學土木工程學研究所碩士論文，台北。
魏勇帆 (2006)，覆土材料性質對於逆斷層錯動引致上覆土層變形之探討，國立臺灣大學土木工程學研究所碩士論文，台北。

第六章、審查意見回覆

審查意見	審查意見答覆與處理情形
1. 921 地震地表破裂沿線的型態多元，應與土壤種類、厚度、物理特性(如 Stiffness)等有關，建議應先全盤整理沿線的土壤類別，再做必要的研究。只以竹山槽溝為依據，可能不足以代表車籠埔斷層之變形特性。	確如委員所述地震引致地表破裂型態多元，斷層沿線土壤種類、厚度、物理特性等土層特性對破裂型態並無直接研究對應各別關係，根據地調所工程地質探勘資料庫統計車籠埔斷層沿線之土層特性資料，可知斷層沿線土層特性資料並不完善，故本研究選定槽溝及槽溝鄰近之工程鑽孔，以獲取較豐富之土層特性資料，於車籠埔沿線挑選竹山槽溝及中正公園槽溝作為土層特性影響地表破裂型態之研究，如圖 2-1-9 所示，竹山槽溝鄰近地表破裂型態似 a 類，中正公園槽溝似 b 類，土層特性整理結果竹山溝建議地層簡化為黏土層及卵礫石層(37-46 頁)，中正公園槽溝之鄰近工程鑽井尚未有成果報告，初步根據岩心照片判斷建議地層簡化為黏土層、卵礫石層及剪裂帶軟岩(似斷層角礫岩)(46-53 頁)，故本研究將針對兩槽溝設計並建立數值模型，以期了解土層特性對地表型態之影響。
2. 物理模型與數值模型，其界面條件均需簡化，建議可以數值模型為主，物理模型為輔，進行相關不同實驗參數之實驗模型；並列出物理模型與數值模型實驗之參數矩陣。	物理模型與數值模型之配合而言，確如委員所述，數值模型為主，物理模型為輔，於第三章第 3 節數值分析之本文內容進行不同參數討論，並依據不同試驗模型建立數值模型，透過參數矩陣進行參數討論。
3. 離心機實驗之邊界條件與野外原型之比較宜更為詳細。	離心機之試體大小受限於儀器可用空間，圖 3-2-10(a)~(c)為 NCU 離心機掛台空間，長寬高的限制。因此斷層試驗箱的最大外部尺寸，設定為長×寬×高=100 公分×528 公分×67.5 公分。在可用空間內規劃試驗盒尺寸其試體尺寸為長×寬×高= 74 公分×30 公分×32.5 公分，而試驗尺寸亦影響斷層傾角設計，傾角過低其變形範圍超出邊界則試驗無法取得良好成果，本研究的斷層錯動模擬試驗箱及施力設備的設計目標，上述試體尺寸在 80g 的試驗條件下，代表原型尺寸長×寬×厚=59.2 公尺×24 公尺×22 公尺，斷層錯動沿設定 60 度的滑動面，進行不同錯動量的正斷層或逆斷層的離心模擬，原型最大錯動距離可達 5.6 公尺。(102-103 頁)
4. 請論述使用 2D 平面應變做數值與物理模型試驗之正當性。	物理模型於 1g 試驗下，其邊界效應下降如圖 3-2-2(d)所示，觀察剖面之地表變形與俯視圖其他區域地表變形之變形量及變形特徵相似，故本研究採用二維平面應變進行研究討論。
5. 建議觀察斷層移動造成地表變形或應變，從彈性變形到塑性變形，乃至於破裂過程中，所影響地表範圍變化之過程。	於第三章第 3 節數值分析之本文內容進行不同滑移量進行討論，並觀察滑移量對地表變形範圍之影響，亦可透過圖 3-3-10 觀察，紅色區域為彈性區，當斷層滑移量增加時其塑性區開始發生並增加，彙整鄰近土層特性參數可修正數值分析內之土壤組模式及參數，亦可了解其參數與地表變形帶之關係。
6. 未來年度之工作項目建議考量斷層的斜滑移運動特性，並考慮修正本案研究的斷層標的，及時程安排。	斜滑移運動特性之斷層型態，初步規劃為米崙斷層，時程安排於本計畫第三年度，並進行 1g 室內試驗。
7. p.30 第 13 行所述車籠埔斷層北接三義斷層有何證據？（兩斷層上、下盤接觸關係（岩層）不同，且集集地震地表破裂北段從豐原轉向東北東經石岡至卓蘭，而大甲溪北岸后里台地南緣所見之三義斷層露頭，於集集地震時並未見破裂情形）。	依構造地形學觀念推論，車籠埔斷層與三義斷層可能具有共同滑脫面。此見解亦參考地調所(2008)特刊 21 號第 89 頁描述，但考量非本研究關鍵課題，故以修正於稿件內。

8.	p.32 所述「近斷層之變形特徵……，一定要輔以地表調查及…」，而集集地震發生已過十幾年，變形帶寬度大部份已無可考，更甭說斷層帶上結構物變形破壞狀況。而本案進行現地調查人員是否曾經歷並調查過集集地震？現地調查能否得到所需的數據？	本計畫研究團隊成員(林銘郎-計畫主持人、黃文正-研究員)過去曾於集集地震發生初期進行現場調查，對斷層沿線地景地物有一定了解，並於本計畫期間內進行復勘，本次調查主要了解斷層跡沿線房舍復育情況，以了解禁建法令規範是否落實。
9.	集集地震已過十幾年，如何重建地表破裂跡型態？	並無重建地表破裂跡型態，將採用團隊成員過去調查成果，以輔以了解破裂型態差異對地表結構物與土層特性之結構互制行為。
10.	竹山槽溝南、北牆就顯現不相同的變形情況，集集地震地表破裂長約達 100 公里，所選的研究場址的結果能否用於整個車籠埔斷層沿線的變形，那藉此劃定活動斷層敏感區對未來地質法執行上是否爭議會很多？	針對車籠埔斷層槽溝挖掘調查之研究結果顯示，每次大地震造成之地表破裂跡位置，是依其覆蓋在基盤之上覆土層厚度而定，當上覆土層厚度愈厚，材料性質愈疏鬆，斷層可能出露地表的位置變動性愈大，且斷層具有重複性，故針對槽溝及漕溝鄰近工程鑽井彙整土層變形參數，並透過簡化分析以其了解變形帶可能範圍，再以現地調查輔助分析結果。
11.	p.76-p.87 共 12 頁敘述「新城斷層」，所為何事？請說明。此外，以集集地震地表破裂變形研究結果，用以驗證(或應用至)未有任何地表變形記錄的新城斷層，是否恰當 ？	分析模型模擬車籠埔斷層之竹山槽溝及中正公園槽溝，帶入槽溝土層特性以模擬斷層滑移時地表變形特徵，再以新城斷層(另一逆斷層)之土層特性參數驗證數值模型，以建立土層特性與地表變形型態之關係。
12.	摘要請針對重要研究成果進行摘述。	已於稿件內修訂，並摘述研究成果。
13.	公尺、米、m 請統一。	感謝委員提醒，已於稿件內修訂。
14.	p.30 第 16 行台「東」盆地應為台中盆地之筆誤，請修正。	為台中盆地誤植，已於稿件內修訂。
15.	圖 3-1-9 建議加入鑽探孔號或名稱。	感謝委員提醒，已於稿件內修訂。
16.	圖說編排方式請統一(對齊、句號)。	感謝委員提醒，已於稿件內修訂。
17.	圖 3-1-61~63 須註明出處。	感謝委員提醒，已於稿件內修訂。
18.	工作內容主要是土壤層的部份，但岩盤內若有較複雜的構造或斷層面轉折，也可能造成大的變形帶。所以，報告書內也請對所使用方法的限制做說明。	根據黃文正等人(2000)、李錫堤等人(2000)及 Kelson *et al.*(2001)的研究結果，可以看到斷層錯動面除了直線形之外，還有可能是弧形、有轉折點或是其他構造，而，如圖 2-1-9(a)、(b)，未來將對其他之構造形態再做研究，並匯集成表，以供參考。
19.	應把尺度較大的逆(背)衝斷層的變形分布(如草屯地區)列入研究成果合理性分析。	雖然在車籠埔斷層之現地觀察及數值模擬中皆可看到逆(背)衝斷層的出現，但為了簡化問題，本研究先以單一條斷層錯動面為研究對象。
20.	請注意使用 PFC 模擬黏土方法之正確性，均質砂土層 W/H>均質黏土層 W/H>砂土層與黏土層互層之原因需要找出，或解釋。	由於目前 PFC 這套軟體中尚無巨觀與微觀參數之間的轉換公式或內建程式，本研究使用 PFC 模擬黏土時將黏土視為沒有摩擦角，但有凝聚力，也就是在模擬黏土層裡的顆粒間摩擦力設為 0，而顆粒之間加上鍵結力，透過更改鍵結力的強度大小，可以模擬不同凝聚力的黏土。根據目前的研究結果，模擬斷層砂箱的結果中，當黏土顆粒間的鍵結力設為 1×10^3(N)，且斷盤抬升量為 6 公分時，純砂土的情況底下斷層影響範圍最小，為 17.8 公分；而純黏土的情況底下斷層影響範圍最大，為 26.4 公分；互層為兩層的時候，砂土覆蓋於黏土層上的結果是 21.2 公分，黏土覆蓋於砂土層上的結果是 26.4 公分；互層為三層的時候，砂土中間夾黏土層的結果是 23.6 公分，黏土中間夾砂土層的結果是 26.8 公分。由此結果我們可以看到最靠近地表的土層影響很大，如果是砂土層，越厚則影響範圍越大；如果是黏土層，越厚則影響範圍越小。。詳細的影響範圍之比較列於表 3-3-10。

21. 通常漕溝開挖所見斷層角度不大，但模擬所用的角度大，請說明為何。	目前數值模擬最主要的比對對象為斷層砂箱實驗，而在做斷層砂箱實驗時，如斷層傾角越小，實驗用的砂箱就要訂做的越大，因此在做室內實驗時斷層的傾角會受限於實驗的可行性，故前人在做此一實驗時多採用高角度之斷層。而未來如果數值模擬與砂箱比對有成果的話，可以再模擬低角度之斷層，將不會受到同樣的限制。
22. 數值模擬所得的結果雖類似竹山槽溝目前的變形形貌，但是模擬為 1 次斷層作用所造成，是否適用於竹山槽溝 4 次古地震事件所累積的變形結果，請考慮。	在竹山槽溝內所看到的斷層剖面除了 4 次古地震的營力之外，當然也包含了侵蝕、堆積等營力所累積起來影響，才有現今的結果。因此，以一次斷層作用所形成的結果來解釋所有的現象是不夠的，還必需在數值模擬中加入侵蝕作用及多次的斷層錯動作用。這項工作之時程安排於本計劃的第二年度。
23. 請於正式期末報告中詳列鑽探資料成果及其他資料。	感謝委員提醒，已於稿件內增補，詳見第三章第 1 節中中正公園南北井鑽探、篤行工程井鑽探土層特性整理結果及附錄。
24. 所有方法與結果之限制條件應清楚列出。	感謝委員的題醒，本研究所使用之方法學：現地調查、砂箱實驗、數值分析三種方法之限制與比較已詳列於 2.5 小節中的表 2-4-3。
25. 部份錯誤請修正，例如：p.1「地層」液化；p.95(三)地表變形觀測所述「利用地調所災後調查…」，地調所並無新城斷層之災後調查。	感謝委員提醒，已於稿件內修訂。
26. p.1 由何證據證明大茅埔-雙冬斷層在集集地震有動過？若無活動，建議不需列於報告書中。	感謝委員提醒，已從報告書中刪除。
27. 本研究達成的目標僅能簡化到單純平直的斷層上，但斷層沿線常見有彎曲(bend)或是凸出(jog)的情形，其變形行為與地表可能影響範圍均有很大的差異，是否有考慮此一部份？	本研究僅針對單一平直的斷層進行研究，並比對 Kelson et al.(2001) 整理了近地表變形的五種模式中的兩種模式，這兩種模式的斷層錯動是沿著單一平直斷盤錯動，如圖 2-1-9(a)、(b)所示。
28. 第二章研究方法中提及地球物理探測，本計畫是否有進行何種地球物理探測？若無，請減少描述的篇幅。	本研究採取野外調查、文獻統整來了解研究區域內地表地形的變化及地質構造，並搭配地調所外包給顏一勤地質技師事務所所進行的鑽探工程，來了解地質構造及土壤、礫石、岩盤…等的力學性質。
29. 表 3-1-4 921 地震斷層沿線槽溝彙整表及表 3-1-3 等文獻應列出處，其餘引用他人圖表出處及參考文獻等資料亦同。	感謝委員提醒，已於稿件內修訂。

附錄 岩心室內實驗結果報告書