經濟部

經濟部中央地質調查所報告第 9 號
委辦計畫編號（101-5226904000-03-01）

重要活動斷層構造特性調查研究
活動斷層近地表變形特性研究(2/4)

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 101 年 12 月

重要活動斷層構造特性調查研究
活動斷層近地表變形特性研究(2/4)

101 年度期末報告

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　１０１　年　１２　月

目　錄

頁次

摘要 IV

ABSTRACT V

圖目錄 VI

表目錄 XIV

第一章、前言 1

1.1. 計畫背景 1
1.2. 研究目的 5
1.3. 整體構想 5

第二章 研究方法 9

2.1. 文獻回顧 9
2.1.1. 活動與斷層近地表變形特性 9
I. 生長地層 9
II. RELAY FAULT 9
2.1.2. 以岩心資料的觀點回顧並討論台北盆地的形成及演化 9
I. 盧佳遇(1995)—板塊楔形聚合理論 11
II. 李錦發(1999)—斷層楔盆地說 12
III. 鄧屬予(2000、2001)—構造陷落盆地說 12
IV. 洪奕星(2006)—火山陷落盆地 16
2.1.3. 日本 SHIONOHIRA 斷層 17
I. 日本 FUKUSHIMA 地區的活動正斷層 18
II. 同震地表變形 19
2.1.4. 美國新墨西哥州 PAJARITO 斷層 24
I. 地質背景 24
II. PAJARITO 斷層系統 26
2.1.5. 國內外禁限建案例探討 30
2.2. 現地查核 33
2.2.1. 鑽探資料彙整 33
2.2.2 鑽探資料統計及空間變異分析 37
2.3. 砂箱實驗 40

2.3.1. 1G 砂箱實驗 40
I. 實驗模型設計 40
II. 材料性質 40
III. 實驗規劃與成果 40
2.3.2. 離心機斷層錯動模型實驗 46
I. 離心模型試驗的因次分析 46
II. 離心模型試驗模型試驗箱設計及試驗規劃 48
III. 試驗用砂的性質 49
IV. 人工黏土的性質 50
V. 目前完成的斷層錯動試驗種類及試驗條件 51
VI. 逆斷層試驗成果及不同 G 值試驗結果的比較比較 52
2.4. 數值分析 67
2.4.1. 連續體分析法 67
2.4.2. 非連續體分析法 70
I. 數值分析模型 70
II. 數值分析參數 71
III. 剪應變之計算 71
IV. 地表變形及斷層帶之描述方式 73
V. 模擬規劃 77
2.4.3. 以實驗方法選定微觀參數 77
I. 離心模型自重壓密試驗 77
II. PFC2D 自重壓密數值試驗 78
2.5. 斷層帶中應變集中帶的定義 92
第三章 計畫成果 94
3.1. 現地查核 94
I. 三腳斷層在基盤分佈的特性 94
3.1.2. 山腳斷層鑽探資料統計 97
3.1.3. SHIONOHIRA FAULT 110
I. 塩ノ平槽溝 110
II. 齊道槽溝 111
3.1.4. 國內外禁限建法規整理 114
I. 美國加州 114
II. 紐西蘭 115
III. 日本 115
IV. 中國 115
V. 台灣 116

3.1.5. 前期之車籠埔斷層後續精進.....120
3.2. 室內實驗.....123
3.2.1. 離心模型砂土試體正斷層錯動試驗結果與討論.....123
3.2.2. 離心模型黏土試體正斷層及逆斷層錯動試驗結果與討論.....125
3.3. 數值分析.....151
3.3.1. PFC 微觀參數模擬比較-直剪實驗模擬.....151
3.3.2. 1G 模擬.....152
I. 比較砂箱實驗結果與數值模擬.....152
II. 正斷層模擬.....154
III. 生長斷層模擬.....163
IV. 剪切帶受結構物影響.....170
3.3.3. 高 G 模擬.....176

第四章 結論.....181

4.1. 現地調查.....181
4.2. 室內實驗.....181
4.2.1. 生長斷層實驗.....181
4.2.2. 離心機實驗.....181
4.1. 數值分析.....182

參考文獻.....184

委員意見回覆.....188

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、物理實驗及數值模擬,分別進行基本行為觀察及定量分析。

本年度(第二年度)的研究規劃裡正斷層為主要研究對象,為了解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;現地調查方面,本研究選定山腳斷層與日本之 Shionohira 斷層為模擬對象,以鑽探資料或槽溝剖面建立簡化地層剖面,並提出簡化之土層參數。物理實驗方面,本研究進行 6 組 1g 砂箱實驗,其結果顯示當正斷層包含生長層時剪切帶發展至地表的速度會加快;另外也進行 24 組離心機砂箱實驗,探討正斷層錯動時,上覆土層變形行為及對結構物之影響;另外,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。而在數值模擬方面,又分成連續體分析法及非連續體分析法,以砂箱尺度及全尺度數值分析探討正斷層作用、生長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。

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

ABSTRACT

According to the investigations of well-known disastrous earthquakes in recent years, ground deformation induced by faulting is one of the causes for engineering structure damages 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. However, a few buildings in the zone retained intact although those buildings had been displaced and rotated. Therefore, mechanisms of near ground deformation due to faulting, and its effect on engineering structures within the influenced zone are worthy of further study.

The type of normal faults is chosen as the main study subject during the second year in this project. To understand the deformation charateristics (including development and propagation of shear zone, possible parameters influencing the mechanisms) along the two sides of the fault, Sanchiao Fault in Taiwan and Shionohira Fault in Japan are selected as the verification cases for laboratory and numerical simulations. Simplified stratum with soil or rock parameters is proposed based on geotechnical boring logs or trench profiles. About laboratory testing, simulations of normal faults in a sand box configuration under 1-g or centrifuge conditions are conducted and analyzed. Furthermore, the laboratory test results were also employed to verify the numerical models, including continumm models and discrete element models. Once the numerical models are examined, different scenarios are designed and analyzed in the models in order to propose a possible approach to evaluate the extensions of the influenced zones, and the safety of nearby engineering structures.

The above approaches benefit us in enhancing our understanding on how propagation of fault-tip affects the width of deformation zone near the ground of the soil/rock mass, the spatial distribution of strain and stress within the influenced zone, and the responses of engineering foundations, which are crucial in evaluating theoretical setback widths. In addition, modification of the design codes of the foundations by studying the soil-structure interactions is also an alternative approach to hazard mitigation strategy.

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 臺北盆地深鑽井位置示意圖.....10
圖 2-1-2 左圖是利用砂盒模型來模擬臺灣造山帶的運動學模式，右圖為北臺灣區域構造示意圖.....11
圖 2-1-3 左圖是盆地西半部的鑽井位置圖，右圖是樹林剖面的井孔比對.....12
圖 2-1-4 上圖是山腳斷層 11 號井岩心 208~212 公尺段，下圖是關渡 1 號井岩心 272~276 公尺段.....15
圖 2-1-5 上圖是 228 公園水文井岩心 112~120 公尺段，下圖是士林 1 號井岩心 272~276 公尺段.....15
圖 2-1-6 HAMADORI 地震的位置及斷層機制解.....18
圖 2-1-7 FUKUSHIMA 地區的活動斷層及地質圖.....19
圖 2-1-8 HAMADORI 地震所造成的地表破壞的位置.....20
圖 2-1-9 YUNOTAKE 斷層南延的地震地表破壞.....21
圖 2-1-10 ITOZAWA 西斷層的地震地表破壞.....21
圖 2-1-11 SHIONOHIRA 斷層北段沿線旱田中地震引致開張斷層崖.....21
圖 2-1-12 SHIONOHIRA 斷層南段沿線橫跨柏油馬路的地震引致地形崖.....22
圖 2-1-13 SHIONOHIRA 斷層沿線的地表錯動量.....22
圖 2-1-14 SHIONOHIRA 斷層在齊道地區的地表特徵及地震前後的形貌.....23
圖 2-1-15 RIO GRANDE 斷裂谷的 JEMEZ 山脈及 ESPANOLA 盆地之位置圖.....25
圖 2-1-16 PAJARITO 高原鄰近 LOS ALAMOS 美國聯邦研究機構的數位地形圖.....26
圖 2-1-17 PAJARITO 斷層系統的斷層圖及開挖槽溝位置.....28
圖 2-1-18 PAJARITO 斷層帶的構造現象.....29
圖 2-1-19 PAJARITO 斷層系統中的 RENDIJA CANYON 斷層之 GUAJE PINE 槽溝.....30
圖 2-1-20 車籠埔斷層跡經過房舍(箭頭處)轉向自西南方.....31
圖 2-1-21 斷層錯動引致房舍位移及民眾復原現況.....31
圖 2-1-22 加州柏克萊區域 HAYWARD 斷層跡.....32

圖 2-1-23 加州柏克萊區域 HAYWARD 斷層引致地表破裂 32
圖 2-2-1 以標準貫入試驗值推估黏性土壤彈性模數 34
圖 2-2-2 標準貫入試驗值與摩擦角關係圖 35
圖 2-2-3 標準貫入試驗值與正規化彈性模數關係圖 36
圖 2-2-4 標準貫入試驗值直方圖與分佈頻率圖 38
圖 2-2-5 自相關函數類型 39
圖 2-3-1 1G 正斷層砂箱 42
圖 2-3-2 斷層傾角 60^{O}，上覆砂土層為 20CM 之正斷層實驗結果 42
圖 2-3-3 斷層傾角 30^{O}，上覆砂土層為 20CM 之正斷層實驗結果 43
圖 2-3-4 斷層傾角 60^{O} ，上覆砂土層為 30CM 之正斷層實驗結果 43
圖 2-3-5 斷層傾角 60^{O}，上覆砂土層為 40CM 之正斷層實驗結果 44
圖 2-3-6 一層生長層之正斷層實驗結果 44
圖 2-3-7 一層生長層之正斷層實驗結果(重複性實驗) 45
圖 2-3-8 一層生長層之正斷層實驗結果(重複性實驗) 45
圖 2-3-9 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 56
圖 2-3-10 離心模型、數值或分析模型及現場全尺度試驗相互關係 56
圖 2-3-11 土壩原型與 1/N 縮尺離心土壩模型 57
圖 2-3-12 (A)斷層錯動模擬試驗箱(B)地表剖面掃瞄台車 57
圖 2-3-13 (A)正斷層錯動試驗之座標及試驗配置圖(B)逆斷層錯動試驗之座標及試驗配置圖 58
圖 2-3-14(A) 掃瞄台車在逆斷層錯動試驗過程中所量測之地表剖面(B)掃瞄台車在正斷層錯動試驗過程中所量測之地表剖面 59
圖 2-3-15 試驗土樣之粒徑分佈圖 59
圖 2-3-16 裝置於試驗箱上之移動式霣降儀 60
圖 2-3-17 人工黏土的夯實曲線及十字片剪力強度 60
圖 2-3-18 人工黏土試體之準備過程 60
圖 2-3-19 逆斷層錯動試驗(80GRTEST23)，在不同垂直錯動量下的地表變位剖面 61
圖 2-3-20 逆斷層錯動試驗，在不同垂直錯動量的地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係 61
圖 2-3-21 逆斷層錯動試驗(80GRTEST23)，在不同垂直錯動量的正規化地表變位剖面 62

圖 2-3-22 逆斷層錯動試驗(40GRTEST21)，在不同垂直錯動量的地表變位剖面 62
圖 2-3-23 逆斷層錯動試驗(40GRTEST21)，在不同垂直錯動量的地表變位剖面 63
圖 2-3-24 逆斷層錯動試驗(40GRTEST21)，在不同垂直錯動量的正規化地表變位剖面.....63
圖 2-3-25 逆斷層錯動試驗(1GRTEST20)，在不同垂直錯動量的地表變位剖面 64
圖 2-3-26 逆斷層錯動試驗(1GRTEST20)，在不同垂直錯動量的地表變位剖面 64
圖 2-3-27 逆斷層錯動試驗(1GRTEST20)，在不同垂直錯動量的正規化地表變位剖面.....65
圖 2-3-28 逆斷層錯動試驗，在不同試驗 G 值下，不同垂直錯動量的地表變位剖面比較 65
圖 2-3-29 逆斷層錯動試驗在 80G 試驗條件下，垂直錯動距離(50MM; 25%)的斷層側剖面 65
圖 2-3-30 逆斷層錯動試驗在 40G 試驗條件下，垂直錯動距離(50MM; 25%)的斷層側剖面 66
圖 2-3-31 逆斷層錯動試驗在 1G 試驗條件下，垂直錯動距離(50MM;25%)的斷層側剖面 66
圖 2-4-1 數值分析模型 69
圖 2-4-2 數值模擬分析尺寸(模擬室內實驗).....70
圖 2-4-3 以橢圓率描述方形試體所受到的剪力應變量.....73
圖 2-4-4 不同橢圓率及其代表顏色之圖例.....73
圖 2-4-5 試體受剪前後之座標的關係.....74
圖 2-4-6 在非連續體分析法中定義剪切帶之案例.....75
圖 2-4-7 不同選擇階段之方法.....75
圖 2-4-8 不同選擇階段的方法所得之模擬結果(以一層生長地層為例) 75
圖 2-4-9 剪切帶之描述示意圖.....76
圖 2-4-10 離心模型試驗飛行階段的地表沈陷與有效覆土應力的關係（DR=70%） 85
圖 2-4-11 微觀模式組成率與巨觀模式組成率間的關係.....85
圖 2-4-12 $\frac{K_n}{K_s}=3$，不同的K_n值，與楊氏係數(E_V及 E_H)及剪力模數(G_{VH} 及 G_{HH})與異向性程度的關係86
圖 2-4-13 $\frac{K_n}{K_s}=3$，不同的K_n值，與柏松比(ν_{hh}，ν_{vh}及ν_{hv})與異向性程度的關係 86
圖 2-4-14 $K_n=8000000N/m$，不同的$\frac{K_n}{K_s}$值，與楊氏係數(E_V及 E_H)與異向性程度的關係.....87

圖 2-4-15 $K_n = 8000000N/m$，不同的$\frac{K_n}{K_s}$值，與柏松比(ν_{hh}，ν_{vh}及ν_{hv})與異向性程度的關係...87

圖 2-4-16 $K_n = 8000000N/m$，不同的$\frac{K_n}{K_s}$值，與剪力模數(G_{VH} ，G_{VH}及 G_{HH})與異向性程度的關係88

圖 2-4-17 數值模擬所使用顆粒的篩分析曲線與試驗石英矽砂的篩分析曲線之比較 88

圖 2-4-18(A) 建構完成後的數值試驗模型 89

圖 2-4-18(B) 建構完成後的數值試驗模型及分層示意圖.....89

圖 2-4-18(C)建構完成後的正斷層數值試驗模型及分層示意圖.....89

圖 2-4-19 離心模型試驗的地表沈陷與 PFC^{2D} 數值試驗地表沈陷的比較 90

圖 2-5-1 正斷層作用引致上覆土層斷層擴展及擴展路徑示意圖 93

圖 2-5-2 鑽井 SCF-2 顯示山腳斷層上盤台北盆地第四紀沉積物物傾斜及擾動情形.....93

圖 2-5-3 砂箱實驗中應變集中帶之發展情形。黃色點代表斷層尖端.....93

圖 2-5-4 數模擬中應變集中帶之發展情形.....93

圖 2-5-5 數模擬中剪切帶及應變集中帶之發展情形.....93

圖 3-1-1 研究區域鑽井與剖面位置圖.....96

圖 3-1-2 基盤深度剖面(A)成子寮(B)五股(C)丹鳳(D)樹林 96

圖 3-1-3 可能的斷層分支型態.....97

圖 3-1-4 山腳斷層沿線仙渡超高壓變電所基地鑽探位置圖 98

圖 3-1-5 土層物理性質及力學性質隨高程變化圖 101

圖 3-1-6 簡化土層第一層推估力學參數分佈圖 102

圖 3-1-7 簡化土層第一層之物理性質及力學性質分佈頻率圖 104

圖 3-1-8 簡化土層第二層推估力學參數分佈圖 106

圖 3-1-9 簡化土層第二層之物理性質及力學性質分佈頻率圖 107

圖 3-1-10 簡化土層第一層各項參數空間分佈特性.....109

圖 3-1-11 簡化土層第二層各項參數空間分佈特性.....109

圖 3-1-12 塩ノ平槽溝 110

圖 3-1-13 齊道槽溝 112

圖 3-1-14 齊道槽溝復原剖面系列.....113

圖 3-1-15 車籠埔斷層補充鑽探點位置.....120
圖 3-2-1 正斷層錯動試驗，在不同垂直陷落量下的地表變位剖面.....126
圖 3-2-2 正斷層錯動試驗，在不同垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係.....127
圖 3-2-3 正斷層錯動試驗(40GNTEST26，DR=70%) ，在不同垂直陷落量下的地表變位剖面.....127
圖 3-2-4 正斷層錯動試驗(40GNTEST30，DR=70%)，在不同垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係.....128
圖 3-2-5 正斷層錯動試驗(40GNTEST26，DR=70%)，在不同垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係.....128
圖 3-2-6 正斷層錯動試驗(40GNTEST30，DR=70%)，在不同垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係.....129
圖 3-2-7 正斷層錯動試驗(1GNTEST31，DR=70%) ，在不同垂直陷落量下的地表變位剖面.....129
圖 3-2-8 正斷層錯動試驗(1GNTEST31，DR=70%)，在不同垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係.....130
圖 3-2-9 正斷層錯動試驗，在不同 G 值及垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係130
圖 3-2-10 正斷層錯動試驗，在不同垂直陷落量下，正規化地表變位剖面與正規化水平距離關係(80GNTEST24).....131
圖 3-2-11 正斷層錯動試驗(40GNTEST26)，在不同垂直陷落量下，正規化地表變位剖面與正規化水平距離關係.....131
圖 3-2-12 正斷層錯動試驗(40GNTEST30)，在不同垂直陷落量下，正規化地表變位剖面與正規化水平距離關係.....131
圖 3-2-13 正斷層錯動試驗(1GNTEST31)，在不同垂直陷落量下，正規化地表變位剖面與正規化水平距離關係.....132
圖 3-2-14 正斷層錯動時上覆土層體積的變化關係.....132
圖 3-2-15 正斷層錯動陷落試驗在 80G 試驗條件下，垂直陷落距離(50MM; 25%)的斷層側剖面(80GNTEST24).....132
圖 3-2-16 正斷層錯動試驗在 40G 試驗條件下，垂直陷落距離(50MM; 25%)的斷層側剖面(40GNTEST26).....133
圖 3-2-17 正斷層錯動試驗在 1G 試驗條件下，垂直陷落距離(50MM; 25%)的斷層側剖面(1GNTEST18)133
圖 3-2-18 黏土試體十字片剪不排水剪力強度隨深度變化.....134
圖 3-2-19 正斷層錯動試驗(40GNTEST32-C)，在不同垂直陷落量下的地表變位剖面.....134

圖 3-2-20 正斷層錯動試驗(50GNTEST36-C)，在不同垂直陷落量下的地表變位剖面 135

圖 3-2-21 正斷層錯動試驗(80GNTEST37-C)，在不同垂直陷落量下的地表變位剖面 135

圖 3-2-22 正斷層錯動試驗(40GNTEST32-C)，在不同垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係.....136

圖 3-2-23 正斷層錯動試驗(50GNTEST36-C)，在不同垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係.....136

圖 3-2-24 正斷層錯動試驗(80GNTEST37-C)，在不同垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係.....136

圖 3-2-25 正斷層錯動試驗(40GNTEST32-C)，不同垂直陷落量下，正規化地表變位剖面與正規化水平距離關係.....137

圖 3-2-26 正斷層錯動試驗(50GNTEST36-C)，不同垂直陷落量下，正規化地表變位剖面與正規化水平距離關係.....137

圖 3-2-27 正斷層錯動試驗(80GNTEST37-C)，不同垂直陷落量下，正規化地表變位剖面與正規化水平距離關係.....138

圖 3-2-28 正斷層錯動試驗，在最大垂直陷落量下，原型地表變位剖面與原型水平距離關係 138

圖 3-2-29 正斷層錯動試驗(40GNTEST32-C)，試驗前後(垂直陷落量=5CM)，地表裂縫及側視圖 139

圖 3-2-30 正斷層錯動試驗(50GNTEST36-C)，試驗前後(垂直陷落量=5CM)，地表裂縫及側視圖 139

圖 3-2-31 正斷層錯動試驗(80GNTEST37-C)，試驗前後(垂直陷落量=5CM)，地表裂縫及側視圖 140

圖 3-2-32 正斷層錯動試驗(40GNTEST32-C; 80GNTEST37-C)，試驗後(垂直陷落量=5CM)，地表裂縫分佈比較圖.....140

圖 3-2-34 正斷層錯動試驗，在垂直錯動量 5CM ，主要地表裂縫的寬度及深度發展情形(S20) 146

圖 3-2-35 砂試體及黏土試體正斷層錯動試驗，垂直陷落量=5CM 時，地表變形剖面之比較.....147

圖 3-2-36 黏土試體正斷層錯動試驗，不同 G 值下，不同垂直陷落量時，地表角變形之比較.....147

圖 3-2-37 黏土層逆斷層錯動試驗(80GRTEST38-C)，在不同垂直陷落量下的地表變位剖面.....148

圖 3-2-38 黏土層逆斷層錯動試驗，在不同垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係148

圖 3-2-39 黏土層逆斷層錯動試驗，在不同頂升量下，地表角變形之比較.....149

圖 3-2-40 逆斷層錯動試驗(80GRTEST38-C)，試驗前後(垂直陷落量=5CM)，地表裂縫分佈及側視圖 149

圖 3-2-41 逆斷層錯動試驗，在垂直錯動量 5CM ，主要地表裂縫的寬度及深度發展情形(S20) 150

圖 3-2-42 砂土試體及黏土試體逆斷層錯動試驗，垂直陷落量=5CM 時，地表變形剖面比較.....150

圖 3-3-1 直剪試驗數值模擬下微觀與巨觀摩擦角之關係.....151
圖 3-3-2 砂箱實驗與數值模擬結果之定性比較.....153
圖 3-3-3 砂箱實驗與數值模擬結果之定量比較.....154
圖 3-3-4 覆土層厚度 20CM 之正斷層模擬結果.....155
圖 3-3-5 覆土層厚度 30CM 之正斷層模擬結果.....156
圖 3-3-6 覆土層厚度 40CM 之正斷層模擬結果.....157
圖 3-3-7 斷層傾角 30^{O} 之正斷層模擬結果.....158
圖 3-3-8 斷層傾角 45^{O} 之正斷層模擬結果.....159
圖 3-3-9 斷層傾角 60^{O} 之正斷層模擬結果.....160
圖 3-3-10 斷層傾角 75^{O} 之正斷層模擬結果.....161
圖 3-3-11 斷層傾角變化對地表變形之影響.....162
圖 3-3-12 斷層傾角 75^{O} 之正斷層模擬結果.....164
圖 3-3-13 斷層傾角 75^{O}，一層生長層之正斷層模擬結果.....165
圖 3-3-14 斷層傾角 75^{O}，二層生長層之正斷層模擬結果.....166
圖 3-3-15 斷層傾角 75^{O}，三層生長層之正斷層模擬結果.....167
圖 3-3-16 生長層對剪切帶發展高度比之影響.....168
圖 3-3-17 生長層對剪切帶向下盤發展之寬度比之影響.....168
圖 3-3-18 生長層對剪切帶向上盤發展之寬度比之影響.....169
圖 3-3-19 生長層對反向斷層發展距離比之影響.....169
圖 3-3-20 地表結構物對斷層帶發展範圍之影響數值模擬尺寸示意圖.....170
圖 3-3-21 剪切帶受結構物影響模擬結果(X*=0.5B).....171
圖 3-3-22 X*=0.5B 時不同重量的結構物受影響之差別.....171
圖 3-3-23 剪切帶受結構物影響模擬結果(X*=1.0B).....172
圖 3-3-24 X*=1.0B 時不同重量的結構物受影響之差別.....172
圖 3-3-25 剪切帶受結構物影響模擬結果(X*=1.5B).....173
圖 3-3-26 X*=1.5B 時不同重量的結構物受影響之差別.....173
圖 3-3-27 剪切帶受結構物影響模擬結果(X*=2.0B).....174

圖 3-3-28 X*=2.0B 時不同重量的結構物受影響之差別 174
圖 3-3-29 不同重量的結構物受影響之差別.....175
圖 3-3-30 不同錯動量下正斷層離心機試驗的地表沈陷與 PFC2D 數值試驗結果比較($\Phi_M=25^O$) 177
圖 3-3-31 不同錯動量下正斷層離心機試驗的地表沈陷與 PFC2D 數值試驗結果比較($\Phi_M=30^O$) 178
圖 3-3-32 不同錯動量下正斷層離心機試驗的地表沈陷與 PFC2D 數值試驗結果比較($\Phi_M=36^O$) 178
圖 3-3-33 PFC2D 正斷層數值試驗顆粒接觸力鏈結分佈圖($\Phi_M=36^O$，垂直錯動量=5 CM).....179
圖 3-3-34 不同錯動量下正斷層離心機試驗的地表沈陷與 PFC2D 數值試驗結果比較($\Phi M=36^O$) 179
圖 3-3-35 降低 K_N 後 PFC2D 正斷層數值試驗顆粒接觸力鏈結分佈圖($\Phi_M=36^O$，垂直錯動量=5CM)...180
圖 3-3-36 PFC2D 砂試體正斷層數值試驗，垂直錯動 5CM 後，試體內垂直變位的等高線圖 180
圖 3-3-37 PFC2D 砂試體正斷層數值試驗，垂直錯動 5CM 後，試體內網格變位圖 180

表目錄

表 1-1-1 台灣活動斷層參數資料表 4
表 2-1-1 臺北盆地各鑽井景美層頂部深度資料 14
表 2-2-1 標準貫入試驗值與相對密度、摩擦角對照表 35
表 2-2-2 砂層之正規化彈性模數對照表 36
表 2-2-3 不同土壤之波松比 37
表 2-2-4 常見土壤力學及一般物性參數變異係數 39
表 2-3-1 不同條件之正斷層試驗 41
表 2-3-2 離心模型與原型之相似性比較 53
表 2-3-3 試驗土樣之基本物理性質 54
表 2-3-4 四組粘土試體的基本性質 54
表 2-3-5 目前已完成的試驗編號及試驗條件 55
表 2-4-1 現地尺度分析之參數表 69
表 2-4-2 砂箱尺度參數探討之分析參數值 69
表 2-4-3 數值分析所用參數 71
表 2-4-4 楕圓率與剪應變、應變楕圓傾角、體積應變及最大伸長量之關係 72
表 3-1-1 本研究參考地調所之地質鑽井與基盤深度 95
表 3-1-2 各剖面古地形傾角(*B*)與構造傾角(*A*) 96
表 3-1-3 山腳斷層沿線仙渡超高壓變電所基地地層分佈表 99
表 3-1-4 山腳斷層於仙渡超高壓變電所附近地層簡化表 100
表 3-1-5 土壤一般物性及力學性質之分佈特性 108
表 3-1-6 美國、紐西蘭、日本、中國大陸及台灣活動斷層帶管制比較表 117
表 3-1-7 我國有關活動斷層之土地管理法規整理 119
表 3-1-8 車籠埔斷層位於中正公園附近地層分佈 121
表 3-1-9 車籠埔斷層位於中正公園西南側地層分佈 121
表 3-1-10 豐原中正公園鑽孔處簡化土層表 122
表 3-1-11 豐原中正公園西南側鑽孔處簡化土層表 122

第一章、前言

1.1. 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表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。其中逆斷層的部份，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。而正斷層的部份，雖然在台灣僅有一條山腳斷層為正斷層，但由於山腳斷層緊臨大台北都會區，穿過山腳斷層之結構物包含台鐵、高鐵、中山高速公路等重大建設，因此當地震來臨時，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是一個相當重要的課題，然而這個課題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。而 33 條活動層

裡，只有一條是正斷層，即鄰近大台都會區裡的山腳斷層(斷層編號 1)，山腳斷層屬第二類活動斷層，因為幾百年來正斷層的上盤持續陷落，因此斷層跡被覆蓋在厚厚的沉積層底下，真實位置不得而知，僅能試圖透過鑽探的結果還原地底的資訊。

由台北盆地內的地質鑽井所整理出來的剖面資料可以研判山腳斷層為一生長斷層，且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

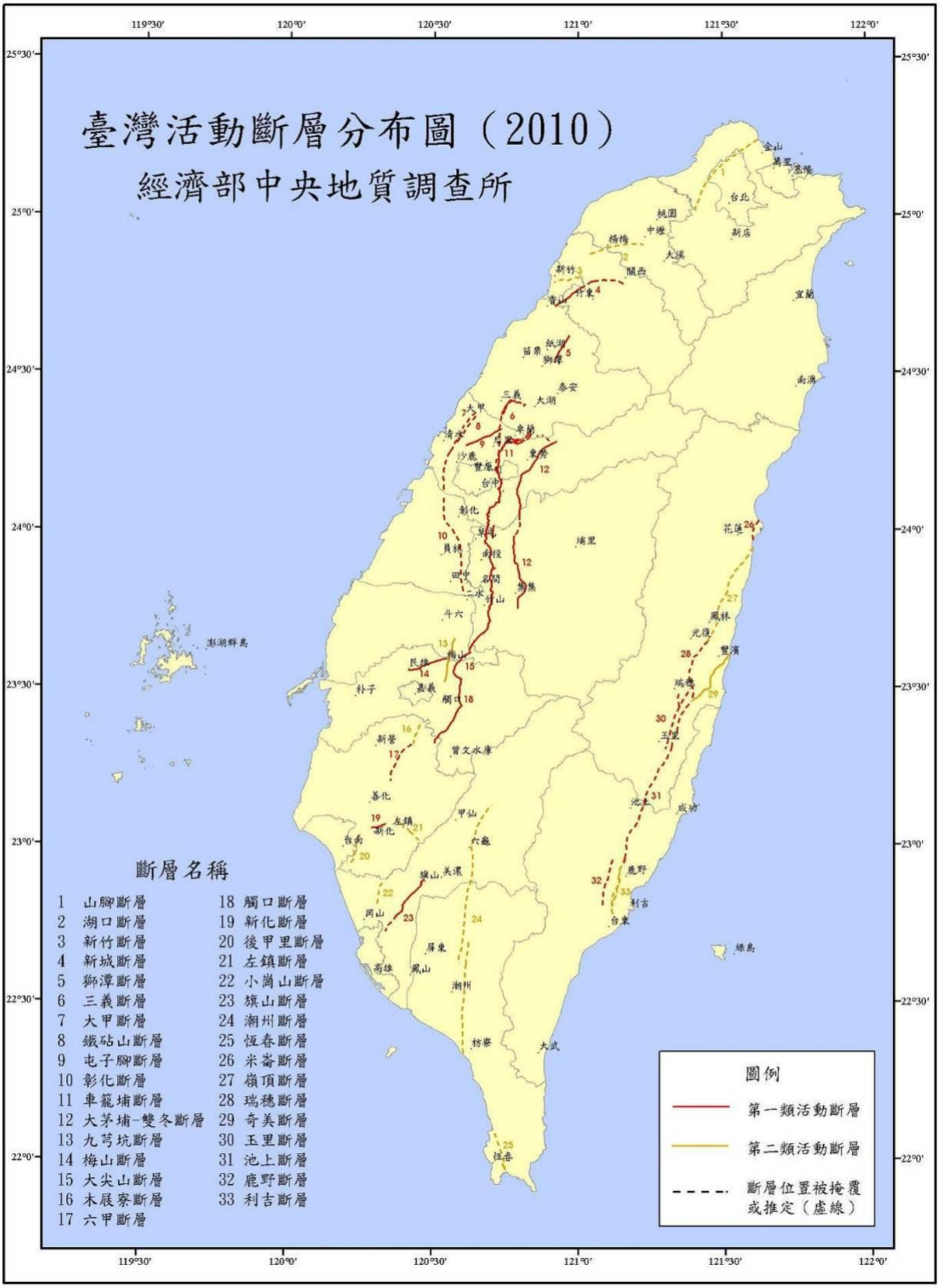


圖 1-1-2 台灣活動斷層分布圖(中央地質調查所，2010)

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)	二	22*	正移 a	>60/東 a	-0.6±5.2b	-1.2±6.2b	-2.2b	2.1±10.2b		2.2 v			<11,000a	(6.9)
(南)		13a			-1.3±5.8b	-5.0±7.4b	-10.8 b	2.3±12.3b	1.8c 1.2u					
2 湖口斷層	二	21*	逆移 a	~40/南 a	+0.2 ± 3.2b	4.1 ± 4.2b	-2.1 b	1.2 ± 7.8b			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		17-19l	15-16.5m	12-28m	23.5-27n >8.3o		26-30n 15.6-17.0◎	50-125n	A.D.2003o	6.6 (7.2)
32 鹿野斷層	一	18*	逆移 s	/東 n		13-15q		26r	~3o 5.5w 1.85w		5.4w	2100w	更新世晚期 s <1890-2110w	(6.5)

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)

1.2. 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。

1.3. 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，嘗試以非連續體分析程式(PFC2D)、連續體分析程式(FLAC)進行砂箱成果及現地變形剖面之模擬。採用連續體分析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；非連續體分析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)。

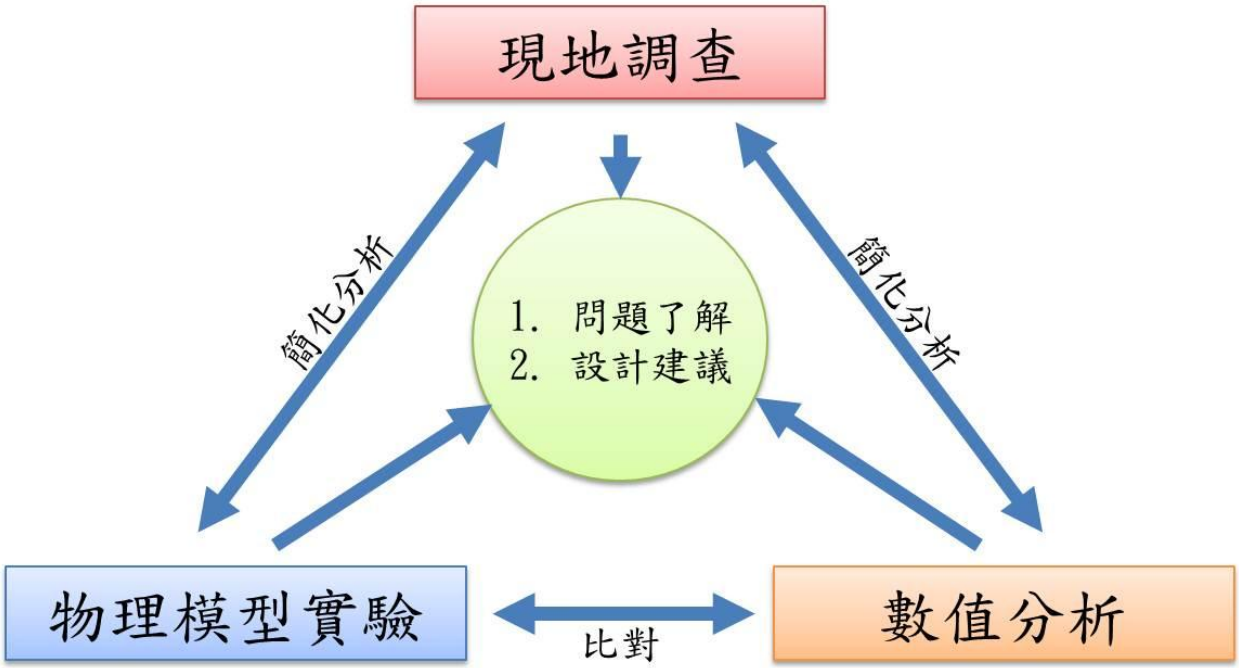


圖 1-1-3 三種研究方法間之整合關係

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。

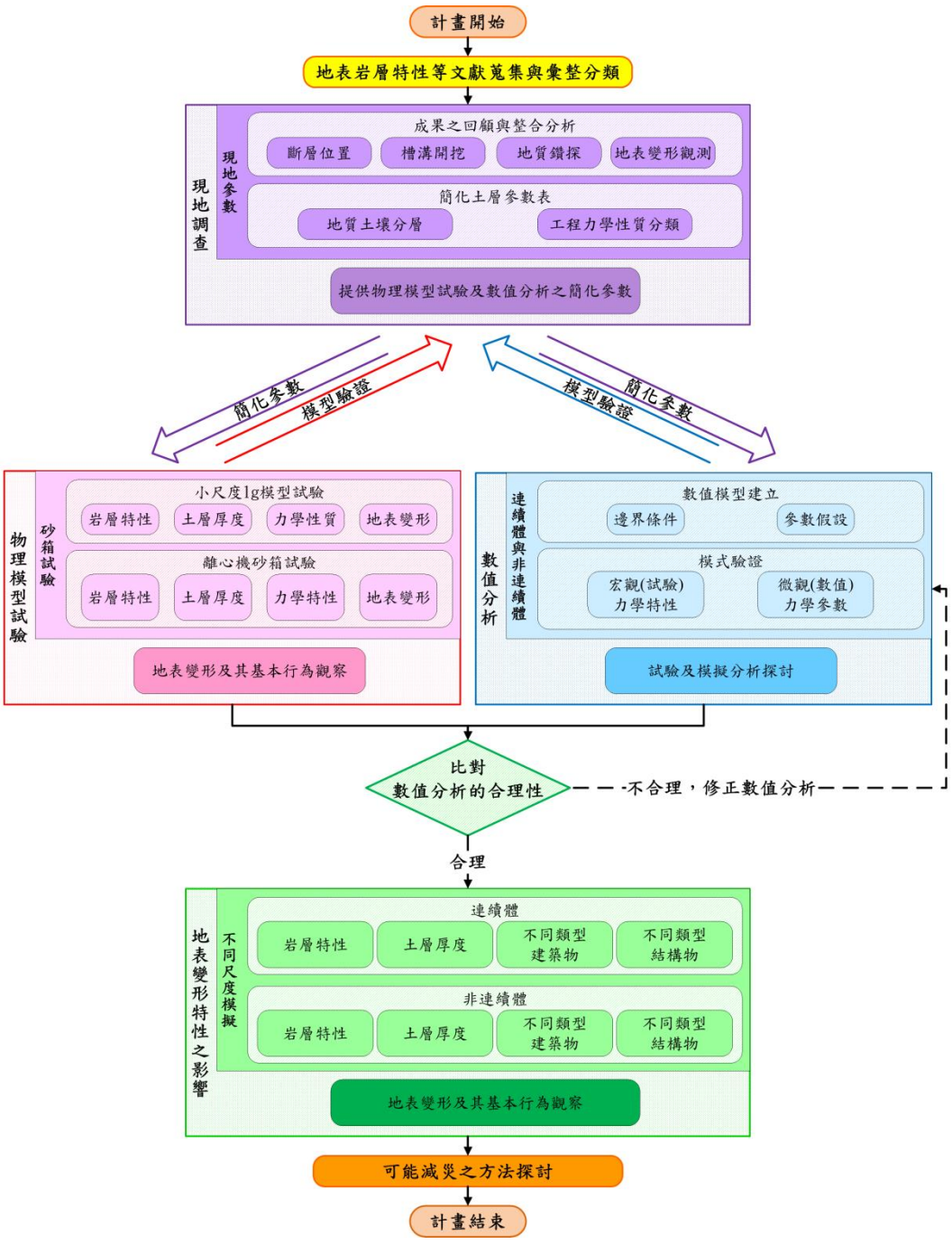

計畫開始
地表岩層特性等文獻蒐集與彙整分類
現地調查
現地參數
成果之回顧與整合分析
斷層位置
槽溝開挖
地質鑽探
地表變形觀測
簡化土層參數表
地質土壤分層
工程力學性質分類
提供物理模型試驗及數值分析之簡化參數
簡化參數
模型驗證
模型驗證
簡化參數
物理模型試驗
砂箱試驗
小尺度1g模型試驗
岩層特性
土層厚度
力學性質
地表變形
離心機砂箱試驗
岩層特性
土層厚度
力學特性
地表變形
地表變形及其基本行為觀察
數值分析
連續體與非連續體
數值模型建立
邊界條件
參數假設
模式驗證
宏觀(試驗)力學特性
微觀(數值)力學參數
試驗及模擬分析探討
比對數值分析的合理性
不合理，修正數值分析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

2.1. 文獻回顧

2.1.1. 活動與斷層近地表變形特性

i. 生長地層

正斷層上盤之沉積層較其下盤之沉積層增厚的現象，一般都解釋為生長斷層(growth fault)機制造成的，生長斷層的發生是由於一面沉積一面斷裂下滑的結果，其在平面上向盆地中心呈凹形，因此由這種特性可以分辨沉積物來源方向及古沉積方向。在垂直剖面看來，斷層面不為平直而具有彎曲狀向盆地中心傾斜，在平行剖面看來，斷層具有陷落中心，且可能因斷層陷落型態不同，形成不同個陷落中心或是陷落中心加深的情況。

垂直剖面可觀察到，斷層傾斜角度隨地層深度增加而減少，最後斷層面會變得與地層面平行，可能形成層面斷層(bedding fault)，生長斷層一般與盆地邊緣平行，且垂直古沉積方向，斷層裂面相互呈平行狀或為雁行排列，在部分地區可能形成地塹地形。

ii. Relay Fault

斷層錯動時破裂沿至上覆土層，因上覆土層材料強度較岩盤軟弱，故破裂尖端可能會在近地表處造成分支現象，於地表觀察則呈現類似雁型排列的平行錯開並排的斷層(Relay Fault)，其不同地表破裂面可能在基盤處為共用底滑面。

2.1.2. 以岩心資料的觀點回顧並討論台北盆地的形成及演化

有關臺北盆地的紀錄相當早，早在 1697 年郁永和為採硫而來臺，他將在臺所見所聞寫成「裨海紀遊」。文中就曾描述當時他從淡水港進入關渡所見的「康熙臺北湖」。臺北盆地的地質研究大約在日據時代開始，隨著區域地質調查使臺北盆地周遭地質越趨明朗；當時出口雄三(1912)在其「大屯火山彙」就推測臺北盆地的形成可能由於大屯火山爆發，產生地下空洞導致陷落。之後更有多位學者對臺北盆地的過往歷史提出看法：牧山鶴彥(1933)在他的研究中認為臺北盆地過去曾經是一個堰塞湖，而後湖泊消失，演變成現

今的臺北盆地；丹桂之助(1939)則提出臺北盆地是一個斷層陷落盆地。當時對臺北盆地的資料有限，無法定論這些研究孰是孰非。隨著臺北都會區快速發展，工程建設與日俱增，與基礎工程有關的地質特性開始受到關注，盆地的地下地質受到重視，也促成了第一口研究探井開鑽(王執明等，1978)。這口探井讓我們對盆地內的沉積物特性與基盤形貌有了嶄新的認識。由於在盆地內有多項重大公共建設進行，包括像捷運興建、鐵路地下化...等，工程界對地下地質資訊的需求日益增加，1992 年深鑽計劃孕育而生。井下資料提供良好的素材，讓學者們能夠明確且深入去探究台北盆地的地下地質。在深鑽帶動下，多篇與臺北盆地有關的研究陸續發表。包括像幾篇有關臺北盆地成因的文章: 如盧佳遇等(1995)所提出的「板塊楔形聚合」(Wedge convergence)理論；李錦發等(1999)所發表的「斷層楔盆地」、鄧屬予(2000、2001)的「構造陷落盆地」說，以及洪奕星等(2006)所提出的「火山陷落盆地」。這些研究引領我們對臺北盆地的身世有更深刻的瞭解。除此之外，學者們也發表了一系列與盆地西邊界斷層，山腳斷層有關的文章: 如 Huang et *al*(2007)、宋聖榮(2007)、陳文山(2008)及陳致同(2012)。

底下統整了過去 20 年來不同先進所發表的研究成果、尚未解決的問題或挑戰，試著利用 1992 年深鑽計劃以來，48 口深鑽井(圖 2-1-1)岩心資料來論述其合理性。

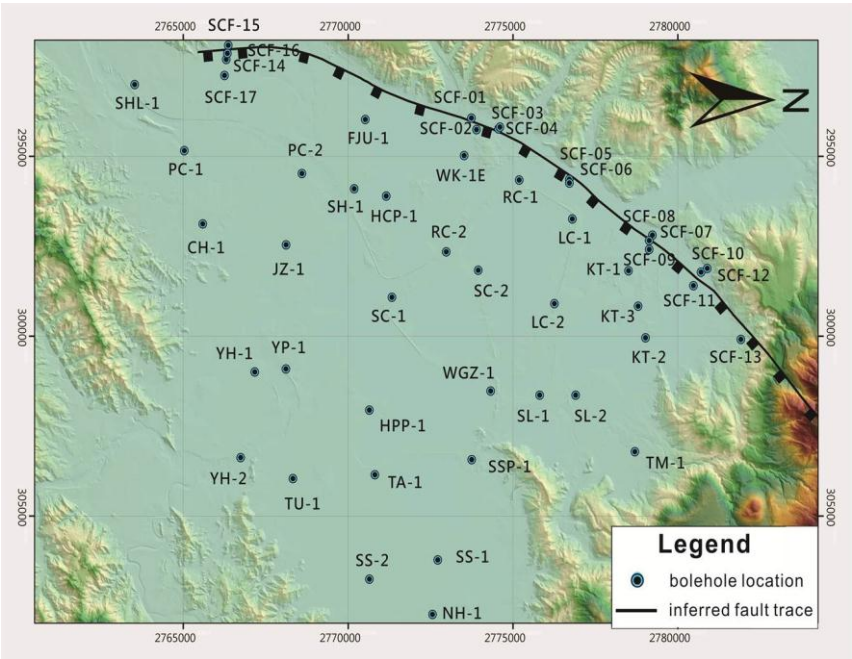


圖 2-1-1 臺北盆地深鑽井位置示意圖。圖中不同點表井孔位置，英文數字表該井位的簡稱及編號，黑色實線為山腳斷層跡地表投影位置

i. 盧佳遇(1995)—板塊楔形聚合理論

盧佳遇等人利用 Wedge convergence 此觀點，應用於臺灣的板塊碰撞概念上。他們認為臺灣的板塊碰撞可以分成兩個走滑斷層(strike-slip fault)系統。與 Lu & Malavieille（1994）利用三維砂盒模型來闡述臺灣造山帶的運動學模式相符合(圖 2-1-2)。運用一不對稱嵌入體與大陸邊緣岩石產生斜碰撞，發展出一個不對稱的楔狀逆衝增積體，並可依相對嵌入點的位置劃分成不同的構造區。變形過程包含了擠壓橫斷及伸張組合產生的逆衝斷層與平移斷層。實驗結果顯示斷層或剪切帶在嵌入點周圍因受到平移斷層的影響而產生旋轉: 在嵌入點東側有區域性順時針旋轉（右移運動）現象；而在嵌入點西側有區域性逆時針旋轉（左移運動）現象。

嵌入點北側則因塊體相對方向旋轉而呈現伸張構造(臺北盆地)，利用此模型盧佳遇等人解釋北臺灣的大地構造。此外，本理論試由砂盒模型來解釋臺北盆地的成因，我們無法利用鑽井岩心資料來判斷此理論其合理性。

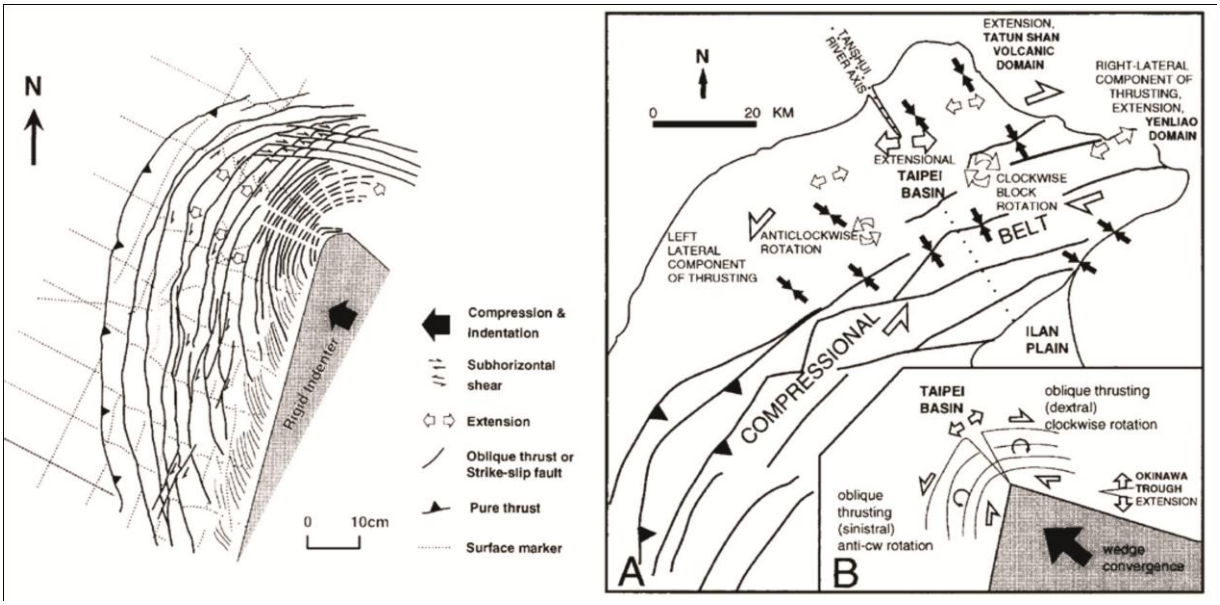


圖 2-1-2 左圖是利用砂盒模型來模擬臺灣造山帶的運動學模式，右圖為北臺灣區域構造示意圖(修改自 Lu，1995)。運用不對稱嵌入體可相對嵌入點的位置劃分成不同的構造區，變形過程包含擠壓橫斷及伸張組合產生的逆衝斷層與平移斷層。實驗結果顯示斷層或剪切帶在嵌入點周圍因受到平移斷層的影響而產生旋轉: 東側有區域性順時針旋轉現象，西側有區域性逆時針旋轉現象；北側則因塊體相對方向旋轉而呈現伸張構造。

ii. 李錦發(1999)—斷層楔盆地說

李錦發等人嘗試以馬尾狀分岔斷層系統所產生的發散斷層楔盆地發展，來解釋臺北盆地的成因。他們認為兩組分岔斷層系統為控制臺北盆地發育的主要構造：早期由崁腳斷層與臺北斷層所組成的分岔斷層系統造就了盆地東南部的發育，後來由於前緣逆衝斷層前移，新莊斷層成為了主要位移帶；新莊斷層與崁腳斷層組成分岔斷層系統的發散作用，使盆地西側基盤持續下陷，而產生現今盆地最深西緣部分。現今的鑽井資料及地球物理探勘都確認了山腳斷層存在，海上震測並將山腳斷層延伸入海，長度也由 40 公里延長至海外的 80 公里長。山腳斷層可能呈現寬數百公尺的斷層帶分布(陳致同，2012)，岩心資料可以看到沿山腳斷層帶往東的五股、樹林剖面(圖 2-1-3)，基盤深度均有落差。符合李錦發所說「約略垂直新莊斷層的樹林斷層與更寮斷層等正斷層系統。」我們認為，李錦發所提出的「斷層楔盆地說」與山腳斷層帶、斷層分段活動有關。

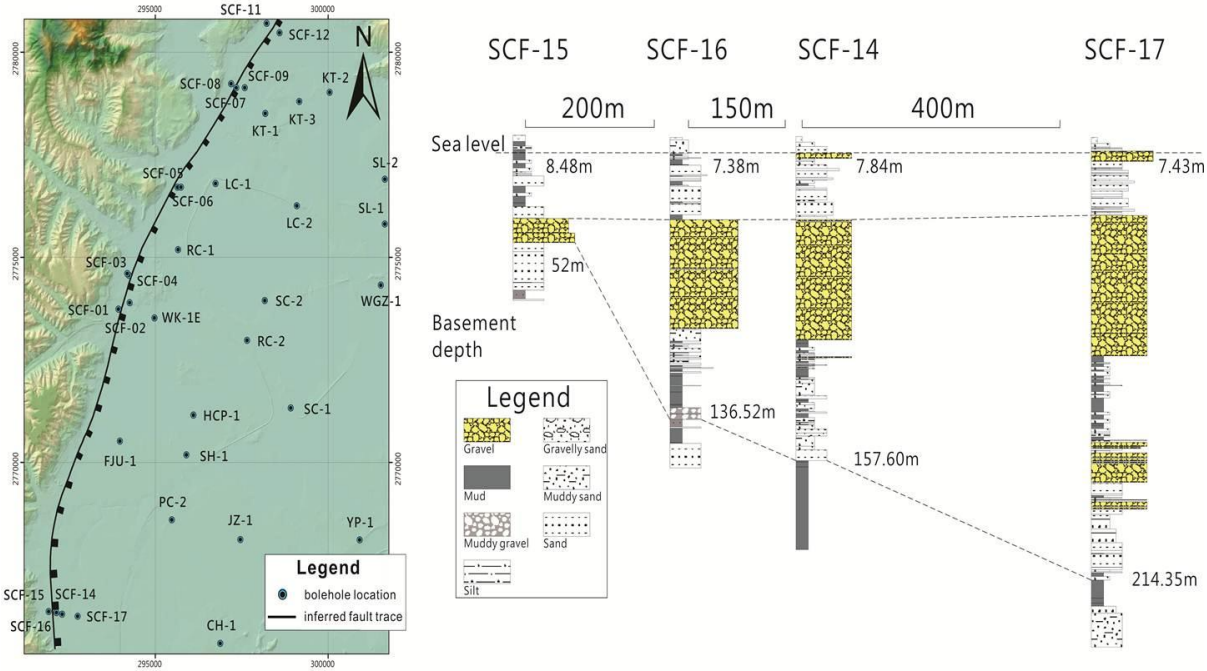


圖 2-1-3 左圖是盆地西半部的鑽井位置圖，右圖是樹林剖面的井孔比對。左圖上紅框標出樹林剖面位置。從右圖岩心資料可以看出樹林剖面各井之間的基盤深度均有落差。

iii. 鄧屬予(2000、2001)—構造陷落盆地說

鄧屬予利用構造陷落盆地此觀點，發表了多篇有關臺灣北部造山帶及臺北盆地成因的文章(1996、2000、2001、2006、2007)。其中他在 2000、2001 年這兩篇文章

中，針對臺北地區提出其形成機制與演化模型。根據他的模型：臺灣在 600 萬年前還是一個被動大陸邊緣，東北部約在 200 萬年前開始碰撞造山，古淡水河也約在此時期往林口沖積形成林口扇洲，新莊斷層逆衝古臺北盆地形成麓山帶。約在 80 萬年前臺灣東北部隱沒板塊方向反轉，應力環境由壓縮轉為伸張，麓山帶開始毀山崩塌，地殼開始下陷。隨著地殼伸張大屯火山開始爆發，古淡水河改道停止對林口扇洲的沉積物供應。80 萬年前到 40 萬年前這段時間火山活動相當旺盛，約在 40 萬年前新莊逆斷層反轉為山腳正斷層，林口台地相對抬升。由於山腳斷層持續滑動，不斷下陷擴展臺北盆地開始沉積。約在 20 萬年前來自大屯火山的火山泥流堵塞了盆地西北側，臺北盆地因此成為了一個堰塞湖。從岩心記錄來看於盆地西北側的井孔可以找到火山泥流沉積物(圖 2-1-4)；也可以在許多鑽井岩心中找到一層紋泥層，代表當時盆地形成堰塞湖的缺氧湖泊環境(圖 2-1-5)。根據大漢溪沉積層的年代學研究(陳于高等，1990；Chen and Liu, 1991)，大漢溪發生襲奪的時間約在 3 萬年前。大漢溪被襲奪進入臺北盆地帶來了大量的礫石沉積物，在盆地中形成以沖積扇與礫石為主的沉積層。1 萬 8 千年以來全球海水面不斷上升，臺北盆地約在全新世早期受海侵形成一半淡鹹水河口灣。潮水出入僅靠狹窄的關渡口，盆地內幾乎都是氾濫平原、沼澤、潟湖等泥質沉積環境，並有相當多的半淡鹹水貝類化石遍及整個盆地。而後海水逐漸退出盆地，陸相的河湖沉積環境再次重現於盆地之中。隨著盆地持續下陷與堆積，面積不斷擴大，最終發展成今日的面貌。鄧屬予針對前人所提出的問題加以統整並發展出此模型，例如：他贊同牧山鶴彥(1933)所提出臺北曾是一座堰塞湖，但根據定年結果他不認為此堰塞湖的沉積物屬於全新世松山層。支持丹桂之助(1939)，認為臺北盆地是由於山腳正斷層作用所形成；定年結果顯示林口台地上的礫石屬於上、更新世沉積物，而臺北盆地中的景美礫石層屬晚更新世。從沉積物記錄來看，他們認為古淡水河為突然改道至臺北盆地，但並不清楚它的機制及原因。此外，大漢溪襲奪年代涉及到景美層的沉積年代，從岩心記錄中可知景美層下界在一些鑽井(如：二二八公園水文井、永和一號、大安一號、臺大一號井)無法與五股層作區分。又碳十四定年的上限為 5 萬年，因此學界間目前對於鄧屬予所提出的「大漢溪襲奪年代」

仍存有不同看法。

鄧屬予在其文章中利用隱沒板塊反轉，詳細解釋了臺北地區造山、毀山的演化史。從岩心記錄來看，於盆地西北部的岩心記錄中可找到許多火山沉積物的蛛絲馬跡(圖 2-1-4)，對這些沉積物作定年及地球化學分析(宋聖榮，2007)也符合當初鄧屬予所說大屯火山噴發帶來大量火山沉積物。對於景美層的部份，似乎也正如鄧屬予所說遍及整個盆地(表 2-1-1)；除了盆地西北部可能是以「關渡層」，同時異相的存在(陳文山，2008)。

表 2-1-1 臺北盆地各鑽井景美層頂部深度資料 .

鑽井編號	鑽井名稱	高程(m)	景美層頂部深度	基盤面(m)
HCP-1	新莊公園一號井	4.20	77.0	478.80
KT-1	關渡一號井	3.97	關渡層(陳文山，2008)	499.00
KT-2	關渡二號井	2.00	關渡層(陳文山，2008)	193.60
KT-3	關渡三號井	3.50	關渡層(陳文山，2008)	302.00
LC-1	蘆洲一號井	1.01	111.7	未鑽遇基盤
PC-1	板橋一號井	10.84	27.0	58.80
PC-2	板橋二號井	6.22	55.0	204.00
SC-1	三重一號井	3.83	56.8	244.90
SC-2	三重二號井	3.50	68.0	228.28
SCF-01	山腳斷層一號井(WK-02)	6.07	36.0	45.10
SCF-02	山腳斷層二號井(WK-03)	6.36	59.9	163.97
SCF-03	山腳斷層三號井	4.80	58.8	未鑽遇基盤
SCF-04	山腳斷層四號井	4.50	39.9	40.42
SCF-05	山腳斷層五號井	0.94	62.1	122.00
SCF-06	山腳斷層六號井	0.66	72.5	222.00
SCF-10	山腳斷層十號井	3.32	43.4	78.00
SCF-11	山腳斷層十一號井	0.28	97.5	未鑽遇基盤
SCF-14	山腳斷層十四號井	7.84	41.5	157.60
SCF-15	山腳斷層十五號井	8.48	40.3	52.00
SCF-16	山腳斷層十六號井	7.38	39.8	136.52
SCF-17	山腳斷層十七號井	7.43	37.8	214.35
SS-1	松山一號井	6.11	50.3	57.30
SS-2	松山二號井	7.21	49.0	90.00
TU-1	台大一號井	8.61	40.8	112.00
TA-1	大安一號井	5.30	48.3	157.50
WK-1E	五股一號加深井	3.97	110.8	679.00
YH-1	永和一號井	4.50	39.0	174.20
JZ-1	江子翠水文井	6.081	53.0	124.40
SH-1	新莊水文井	6.007	66.9	未鑽遇基盤
WGZ-1	衛工處水文井	0.15	65.2	95.1
HPP-1	二二八公園水文井	4.983	46.8	198
SSP-1	新生公園水文井	4.10	65.1	88.00
LC-2	蘆洲二號井	5.458	101.8	未鑽遇基盤
RC-1	二重疏洪一號井	1.427	108.0	未鑽遇基盤
RC-2	二重疏洪二號井	1.832	76.0	未鑽遇基盤
FJU-1	輔大一號井	3.152	63.4	未鑽遇基盤
YH-2	永和二號井	6.463	30.3	未鑽遇基盤
NH-1	內湖一號井	5.876	46.5	未鑽遇基盤

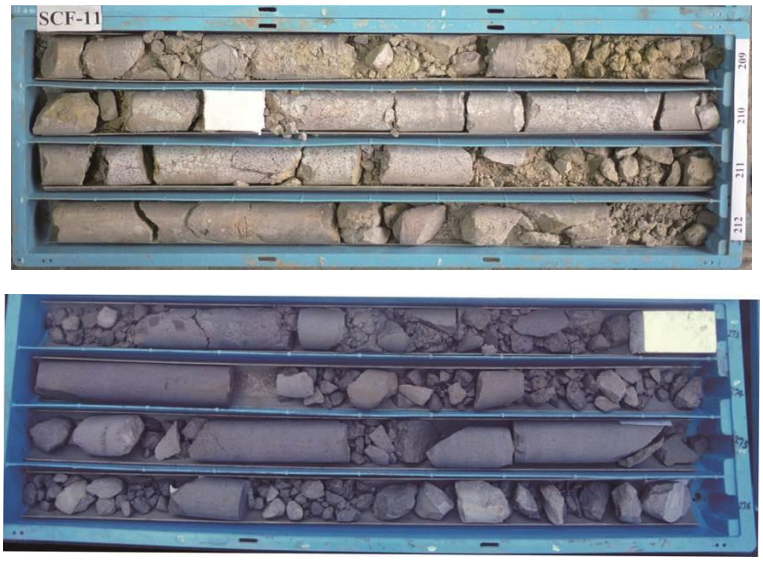


圖 2-1-4 上圖是山腳斷層 11 號井岩心 208~212 公尺段，下圖是關渡 1 號井岩心 272~276 公尺段。兩者皆屬於火山沉積物，在盆地西北邊這幾口岩心常可觀察到。

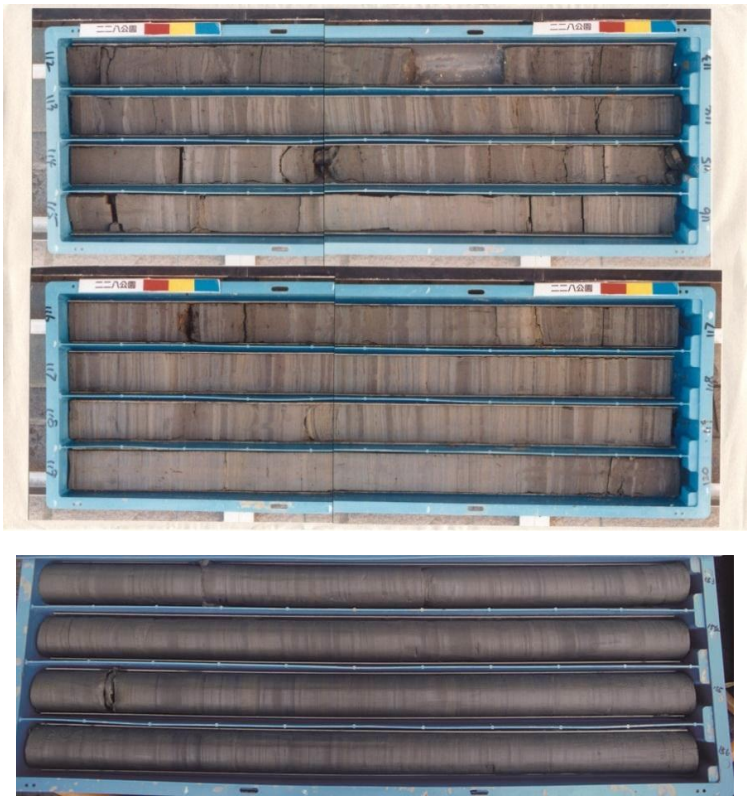


圖 2-1-5 上圖是 228 公園水文井岩心 112~120 公尺段，下圖是士林 1 號井岩心 272~276 公尺段。為典型的泥質紋層沉積物，板橋層的頂界是一層分布廣泛的紋泥，代表 18 到 16 萬年前的堰塞湖堆積物。這些湖相泥層沉積構造發達，有豐富的植物碎屑與孢粉化石，且廣泛出現在臺北盆地西側各井。顯示頗具深度、面積廣闊的淡水湖（鄧屬予等，2004）。

iv. 洪奕星(2006)—火山陷落盆地

洪奕星分析了早期和近期臺北盆地井下 21 口岩心，藉由沉積相分析及井孔間對比來了解臺北盆地內沉積層的種類與性質。同時他們收集過去與新近的定年資料，彙整建立沉積序列的時間架構，探討臺北盆地演化的過程。根據他的模型臺北盆地陷落大約在 40 萬年前左右開始，他們認為臺北盆地可能是由大屯火山噴發所形成的火山陷落盆地。

從關渡經蘆洲到五股一帶是盆地的沉降中心，他們認為盆地的演化大致可區分為 5 個階段: 初期陷落階段、持續深化陷落、中期陷落階段、末期陷落階段，以及近代沖積層沖積。初期陷落階段包含 2 次伴隨火山噴發的陷落，其中第一次約發生在 40 萬年前；而到 20 萬年前發生了第二次的崩陷，並進而形成一內陸淡水湖。此噴發年代與宋聖榮在 2007 年提出大屯火山約在 40 萬年前與 20 萬年前有兩次主要噴發一致。到了約 10 幾萬年前的中期陷落階段，不但使此古臺北湖崩解，更引發海水入侵到關渡蘆洲一帶，同時促成了大漢溪襲奪桃園古石門溪。全新世以來的海進期，海水大幅入侵盆地而形成半淡水湖。最後在淡水河三條支流持續沖積下形成現今的臺北盆地。岩漿溢出地表後，在地下遺留空洞、導致在此空洞上方產生正斷層塌陷。

回顧近 20 年來所鑽取的這 48 口鑽井，盆地西北部的山腳斷層 9 號井、山腳斷層 11 號井、關渡 1 號、關渡 2 號井...等岩心中，都可以找到大量的火山沉積物。洪奕星等人所說的火山噴發陷落年代也與宋聖榮(2007)所作的鉀氬定年年代相符。也許在 40 萬年前、20 萬年前所發生的 2 次火山噴發，的確提供了一些讓臺北盆地陷落的因子，而使關渡經蘆洲到五股一帶成為盆地的沉降中心。

但除了盆地西北部這幾口鑽井之外，在東部、東南部、西南部這幾口鑽井中並未觀察到如此多的火山沉積物，多數井甚至在南部的樹林剖面中都沒有發現。如果以火山陷落盆地此觀點來說明臺北盆地的形成，勢必在其餘各井中也可找到大量的火山沉積物，但從岩心記錄中來看並非如此。因此我們認為洪奕星所說的大屯火山噴發陷落確實可能提供了一部分向下沉陷的動力，但如將臺北盆地成因歸於火山陷落盆地似乎較不合理。

回顧從日據時代以來，出口雄三(1912)、丹桂之助(1939)等人對臺北盆地的推論，到近代深鑽計劃使得盆地地下地質資訊日漸充足。在深鑽帶動下，如前所述有多篇與臺北盆地成因有關的文章先後發表。盧佳遇等人運用一不對稱嵌入體與大陸邊緣岩石產生斜碰撞，發展出不對稱的楔狀逆衝增積體，應用在臺灣的板塊碰撞概念上。嵌入點北側因塊體相對旋轉而產生伸張構造，也就是臺北盆地。1999 年李錦發等人嘗試以馬尾狀分岔斷層系統產生的發散斷層楔盆地發展，來解釋臺北盆地的成因。但從鑽井岩心資料來看，李錦發所提出的斷層楔盆地說似乎與山腳斷層帶、斷層分段活動有關。而後鄧屬予利用構造陷落盆地觀點，針對臺北盆地提出其形成機制，並與前人問題加以統整發展出演化模型。洪奕星分析了臺北盆地井下 21 口岩心，藉由沉積相分析及井孔間對比來了解臺北盆地內沉積層的種類與特性，並探討盆地演化的過程。他們認為臺北盆地可能是由大屯火山噴發後所形成的火山陷落盆地。但在盆地東部、東南部、西南部這些鑽井中並未觀察到如西北部那麼大量的火山沉積物。因此我們認為洪奕星所說的大屯火山噴發陷落確實可能提供了一部分向下沉陷的動力，但將臺北盆地成因歸於火山陷落盆地似乎較不合理。

綜合以上所述，我們認為以現有鑽井資料來說，鄧屬予所提出由山腳正斷層所造成的構造陷落盆地似乎較為合理，近年來多篇有關臺北盆地的研究多支持此論點再進一步去深入討論，如：Huang et *al*(2007)、陳文山(2008)、陳致同(2012)；而關於沉積物的堆積年代與分層(如：景美層)尚有許多討論的空間。

2.1.3. 日本 Shionohira 斷層

繼 2011 年 3 月 11 日日本仙台外海規模 9 級的 Tohoku 大地震，日本本島 Ibaraki-Fukushima 地區在這大地震過後的一個月出現了一系列不尋常的正斷層作用的淺層 Hamadori 地震系列，其中最大的地震規模達 7 級，其震央位置見圖 2-1-6。不尋常之處在於一般認為當地的區域應力屬壓應力的狀態，此乃受到其東側鄰近約呈南北走向的隱沒帶之影響，因此出現正斷層作用的淺層地震相當奇特。Imanishi 等(2012)針對此奇特現象歸納了幾個可能的解釋模式，這包括區域隱沒板塊界面的曲率效應(Hashimoto and Matsu'ura，2006)、上部板塊的彎曲效應(Turcotte & Schubet，2002)、隱沒帶侵蝕所造成的長期伸張及

抬升效應(Reyners and McGinty，1999；von Huene 等，1999)及震間隱沒板塊界面鎖定引發伸張應變(Loveless 等，2010)等。底下我們將針與對本計畫較相關的部份，對 Hamadori 地震在 Fukushima 地區所引致的地表變形及該地的地質背景作個說明。

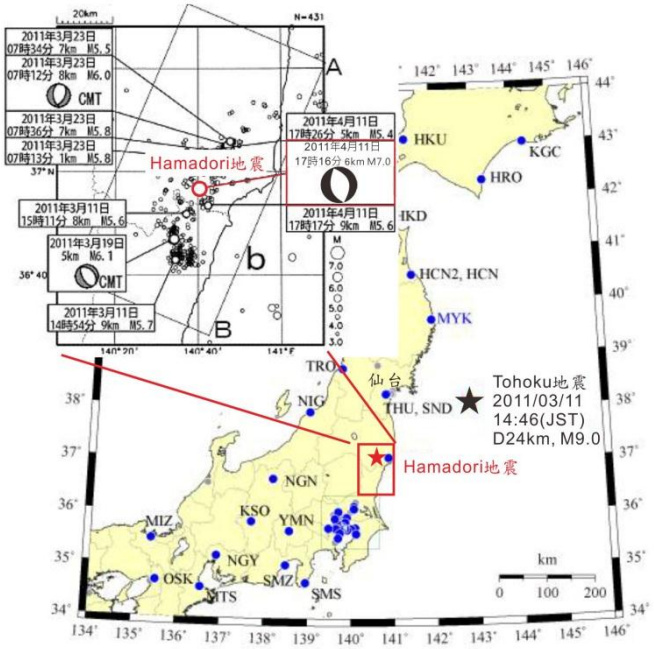


圖 2-1-6 Hamadori 地震的位置及斷層機制解(資料來源：ERI)

i. 日本 Fukushima 地區的活動正斷層

2011 年 4 月 11 日的 Hamadori 地震造成了 Fukushima 地區的三條斷層再活動，包括 Yunotake 斷層、Itozawa 東斷層及 Itozawa 西斷層，其位置見圖 2-1-7，其中 Itozawa 西斷層又稱 Shionohira 斷層，底下我們以此名稱稱之，以方便於與 Itozawa 東斷層區別。Shionohira 斷層與 Itozawa 東斷層緊鄰，兩者約離 2 到 3 公里，皆約呈南北走向，兩斷層兩側皆為白堊紀變質岩；Yunotake 斷層在前兩條斷層的東北邊，呈西北東南走向，其西北端與 Itozawa 東斷層合併，斷層東北側為白堊紀變質岩或長英質火成岩，西南側以中新世沉積岩為主。兩斷層的部份區段在 Hamadori 地震之前，已被日本活斷層研究群(Research Group for Active Faults of Japan, 1991)及日本國家機構 AIST(Advanced Industrial Science and Technology)認定為活動斷層，但因為地表的區域變形率(deformation rate)非常低，因此對斷層的長期滑動量及錯動週期並沒有詳細的研究報導，如 Shionohira 斷層北段的活動度被評為 C 級(平均地表變形速度為 0.01~0.1mm/yr: 松田, 1975)，即低活動度。

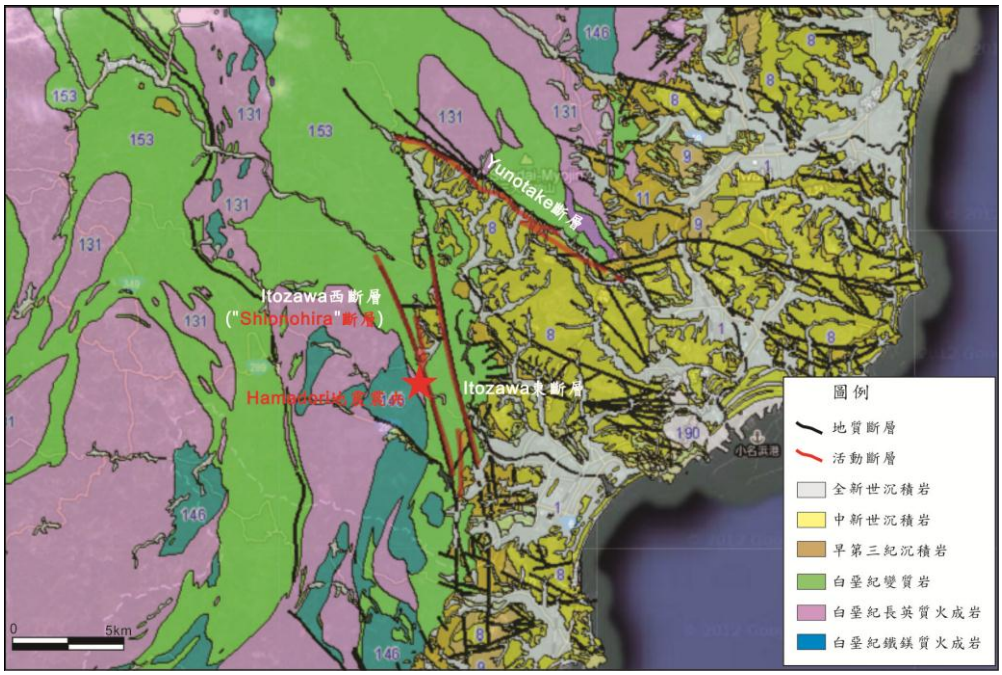


圖 2-1-7 Fukushima 地區的活動斷層及地質圖。紅色的線條為日本 AIST 所公布的活動斷層資料與日本活斷層研究群(Research Group for Active Faults of Japan, 1991)略有不同(圖資來源：AIST)

ii. 同震地表變形

底下的記述主要根據日本地震研究所(ERI)、Kelson 等人(2011)及丸山正等人(2012)的報導。Hamadori 地震所造成的地表破壞主要沿 Yunotake 斷層、Itozawa 東斷層及 Itozawa 西斷層分佈，但這些地表破壞的位置與地震前日本活斷層研究群認定的此三條活動斷層(註:日本稱活斷層)的地表跡頗有出入，如圖 2-1-8 中的虛線即為活動斷層的地表跡，而不同顏色的圈點為丸山正等人(2012)報導的地表破壞位置，特別顯著地是 Shionohira 斷層沿線破壞點最連續，且其北段先前並未被日本活斷層研究群認定為活動斷層，其地表變形稍後再個別詳加描述；Itozawa 東斷層則僅有幾處有破壞變形的現象，圖 2-1-9 為兩張選取該斷層跡上的地震後破壞的情形，從圖上可見該斷層的確有再活動的跡象，但錯動量相對較小(地表的垂直高差可能僅十來公分)；至於 Yunotake 活動斷層的地震地表破壞與斷層跡的位置極大部份有相當的出入，地表破壞主要緊貼著斷層跡西北側地形急促變化的位置，此與斷層跡相距有數百公尺遠，此外，地表破壞超出 Yunotake 活動斷層跡的東南端，持續延伸約有 6 公里遠，圖 2-1-10 中的照片為此延伸段的同震變形之部份情況，地表垂直落差達數十公分，顯著的開張裂縫常見，裂縫的水平寬度最大也可達數十公分。以 Yunotake 及

Shionohira 地表破壞而言，其東側皆為相對抬升側，西側為相對下降側。

Hamadori 地震後早先的地表變形報導，大部份都是針對 Shionohira 斷層沿線的地表變形，原因是其破壞變形的程度相較其它兩條嚴重且顯著，圖 2-1-11 及圖 2-1-12 即為選取的此斷層沿線同震破壞變形之代表照片，延續性佳具明顯高差的張開裂縫為主要的破壞變形特徵，部份地點斷層未露出地表但造成地表面形成類似具一陡坡的單斜褶皺(monocline)，如圖 2-1-12 左邊照片。報導中該斷層跡的同震垂直錯動量最大達 2.1 公尺，圖 2-1-13 即為丸山正等人(2012)所量測的沿破壞變形的垂直及水平錯動量，數據以紅藍兩顏色表示主要是該破壞變形跡在齊道地區呈不連續且並列，因此可分為南北兩段，見圖 2-1-8 及圖 2-1-14。如此一來，最大的總垂直錯動量即在齊道地區，往南北遞減；至於水平錯動呈現有趣的現象，南北兩段在北邊為左移而南邊為右移。再者，北段南端於齊道地區在同震變形(亦即地震斷層)的位置，地震前的地形即有高程差的異常現象，見圖 2-1-14。

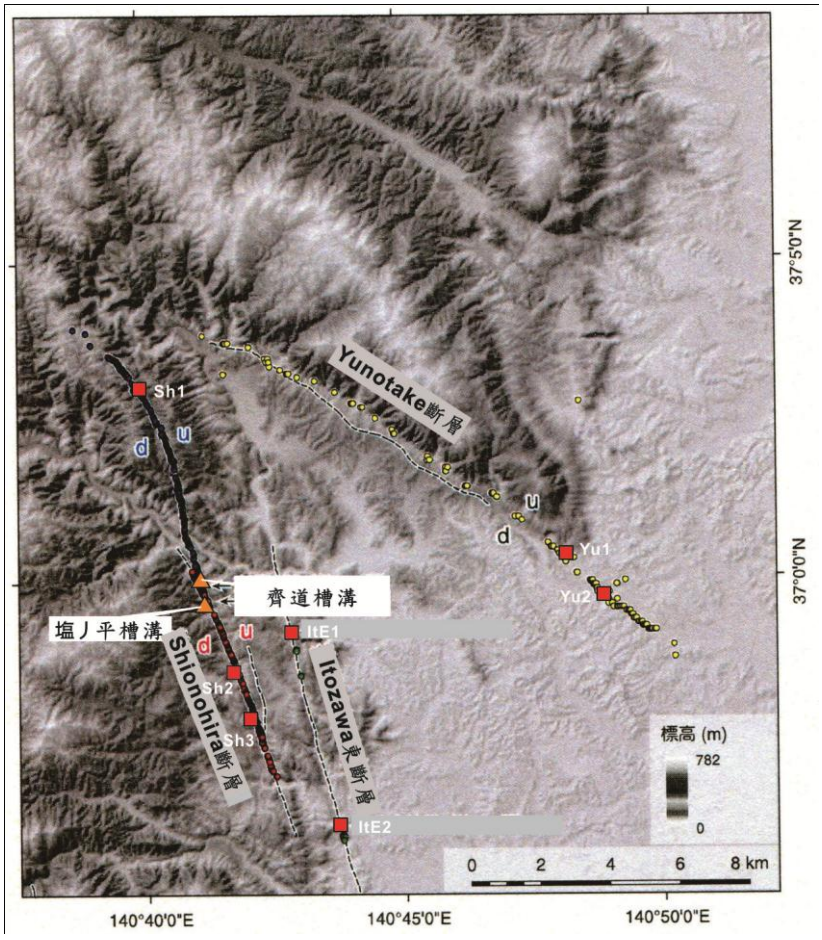


圖 2-1-8 Hamadori 地震所造成的地表破壞的位置。小圓圈即地表破壞變形的地點，顏色代表出現位置沿不同斷層或斷層區段(修改自丸山正等，2012)



圖 2-1-9 Yunotake 斷層南延的地震地表破壞。其位置點標示於圖 2-1-8，左圖的崖高差約 25 公分，帶 10 公分左移錯動量。右圖的地震引致小崖橫越高爾夫球場最大垂直落差約 50 公分，帶 20 公分的右移量(資料來源：Japanese Public Works Research Institute)

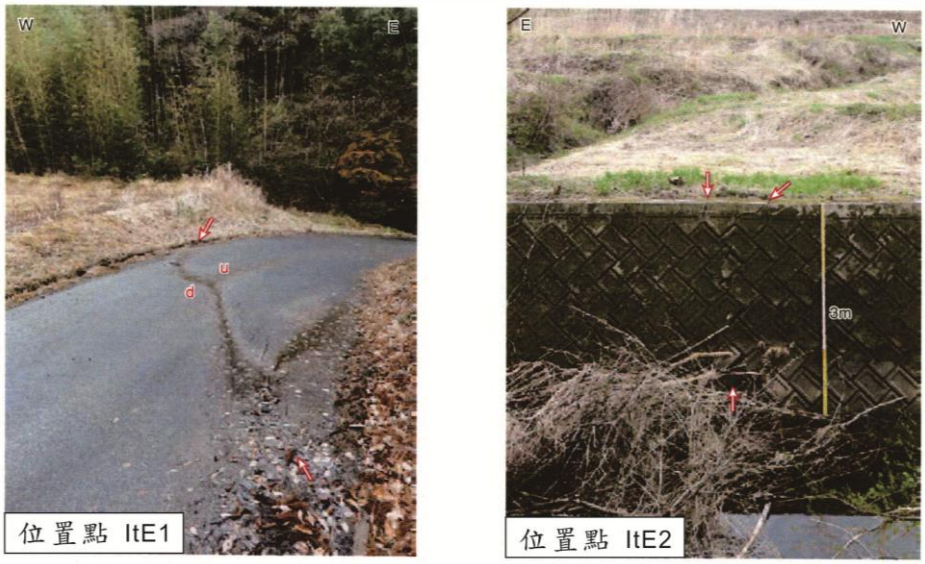


圖 2-1-10 Itozawa 西斷層的地震地表破壞。其位置點標示於圖 2-1-8



圖 2-1-11 Shionohira 斷層北段沿線旱田中地震引致開張斷層崖。其位置點標示於圖 2-1-8，崖面向西，右圖右上方的白色藍頂平房同左圖同位置的小白屋。崖高落差達 50 公分，分均裂縫寬度約 6 公分。(資料來源：ERI)

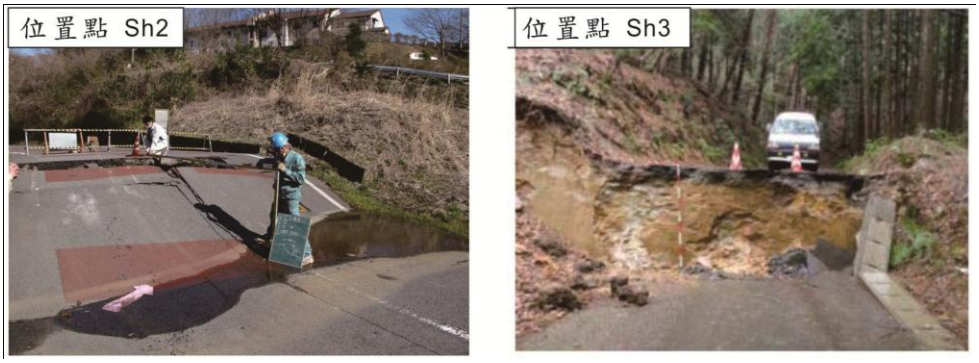


圖 2-1-12 Shionohira 斷層南段沿線橫跨柏油馬路的地震引致地形崖。其位置點標示於圖 2-1-3，左圖路面形成類似具單一陡坡的單斜褶皺，崖高約 1.1 公尺，崖面向西，開張裂縫出現在崖坡上方曲率最大處，帶有約 30 公分的右移錯動量(資料來源：ERI)。右圖路面垂直錯斷，形成落差為 1.8 公尺的近垂直的崖，崖面向西(資料來源：Japanese Public Works Research Institute)。

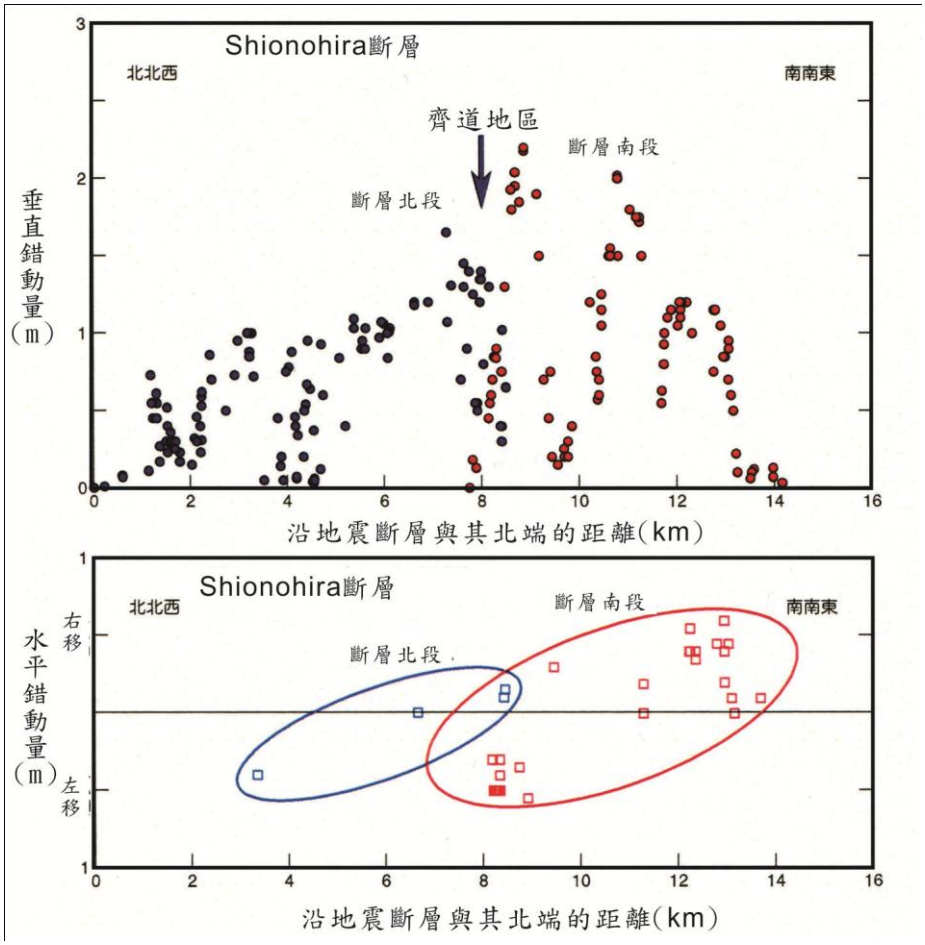


圖 2-1-13 Shionohira 斷層沿線的地表錯動量。藍色為斷層北段的資料，紅色為南段的資料。(修改自丸山正等，2012)

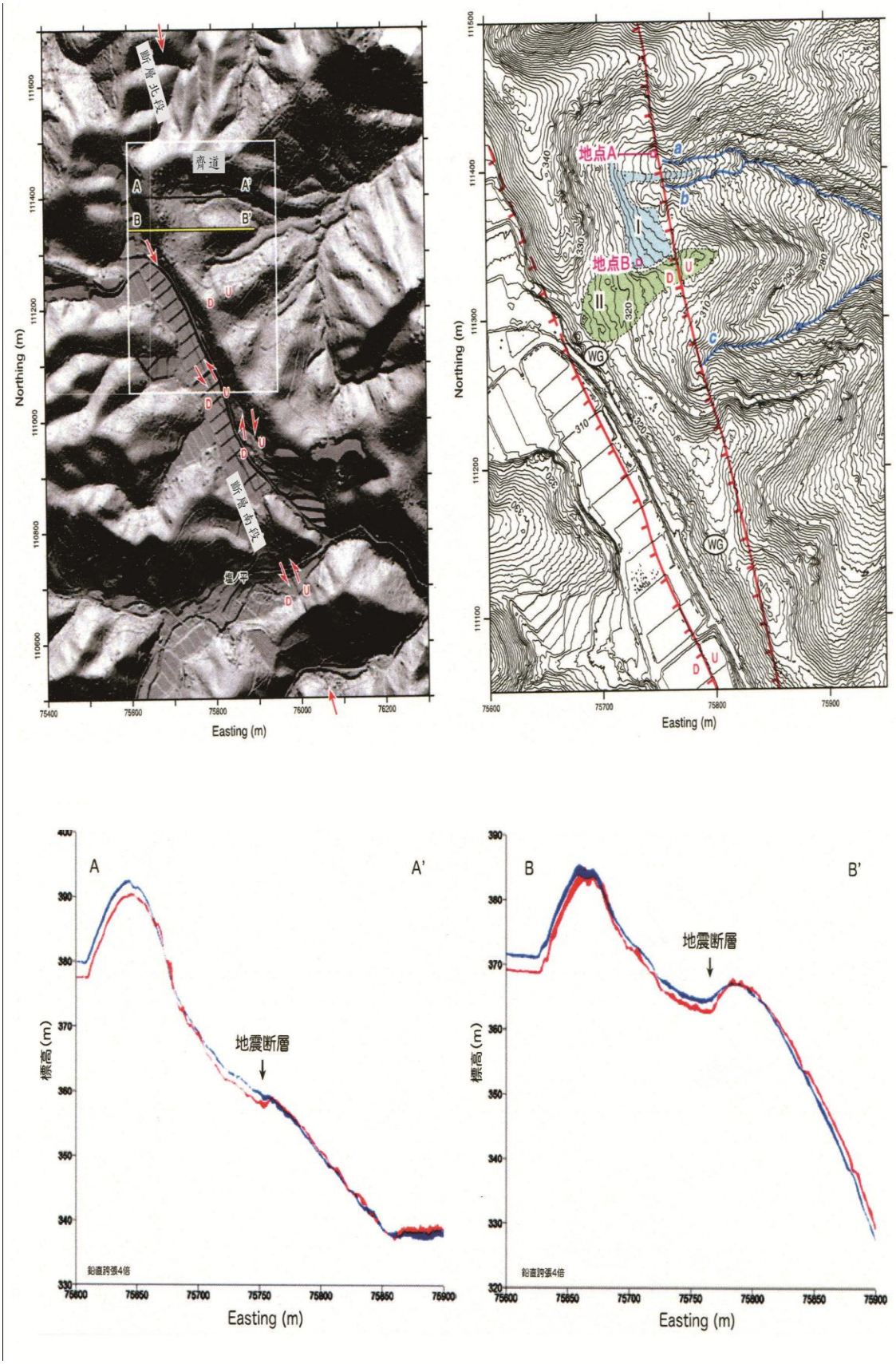


圖 2-1-14 Shionohira 斷層在齊道地區的地表特徵及地震前後的形貌。Shionohira 斷層的南北兩區段在此地接力(relay)，斷層跡的位置大致上與地形坡度的變化密切相關。下方兩圖中藍色曲線為地震前的地形剖面，紅色為地震後。

2.1.4. 美國新墨西哥州 Pajarito 斷層

相較於台北盆地西緣的山腳斷層，具有類似大地構造形成演化背景的 Pajarito 斷層，因少去如同大漢溪及新店溪所帶來的大量沉積物的堆積覆蓋，使其演化後的構造，反倒可由地貌、地表地質及搭配槽溝的開挖一窺究竟，而其呈現的構造形貌極可能反應生長地層覆蓋下的山腳斷層，因此值得進一步的探究，藉以了解山腳斷層的特性。底下的描述方式基本上從大尺度的大地構造著手，到小尺度的槽溝中之構造現象，並綜合所有資料說明斷層的活動性。

i. 地質背景

Pajarito 斷層位在美國新墨西哥州 Rio Grande 斷裂谷(rift valley)的西緣，鄰近處有美國聯邦 Los Alamos 重大研究機構，因此其活動性倍受重視。Pajarito 斷層為一向東傾的正斷層，在大地構造上為向西傾覆的半地塹(half graben)之西緣主要構造之一(Kelly, 1978; Aldrich and Dethier, 1990)，如圖 2-1-15 所示。該斷層主要出露於中新統至第四系，造成約有 100 到 150 公尺高、面東的地形崖，分隔了西側 Jemez 山脈及東側的 Pajarito 高原，而 Rio Grande 斷裂谷則為 Espanola 盆地沉積物給覆蓋。Jemez 山脈的核心為由晚第三紀到早第四紀的安山岩質和石英安山岩質的火山熔岩流及源自破火山口的火山碎屑(caldera-derived tephra)所組成。最近一次期的大噴發約為 1.2 個百萬年，形成了 Valles-Toledo 破火山口及佈蓋廣範的火山灰流所成的凝灰岩(ash-flow tuff)，厚可達 100 公尺，Smith & Bailley(1966)稱它為 Bandelier 凝灰岩。過去的 1.2 百萬年位於 Espanola 盆地裡向南流的 Rio Grande 河，已對 Bandelier 凝灰岩所覆蓋的岩層之東側延伸的部份往下侵蝕了約 150 公尺深，而河流西側的 Pajarito 高原因凝灰岩的屏障而仍矗立如圖 2-1-15 所示。Los Alamos 聯邦研究機構即建立在相對未為溪流切蝕的高原西部，而高原東部受溪流切蝕相對明顯許多，眾多流向往東的水系，溪流越往東邊下切狀況越劇進而匯入 Rio Grande 河，參見圖 2-1-16。

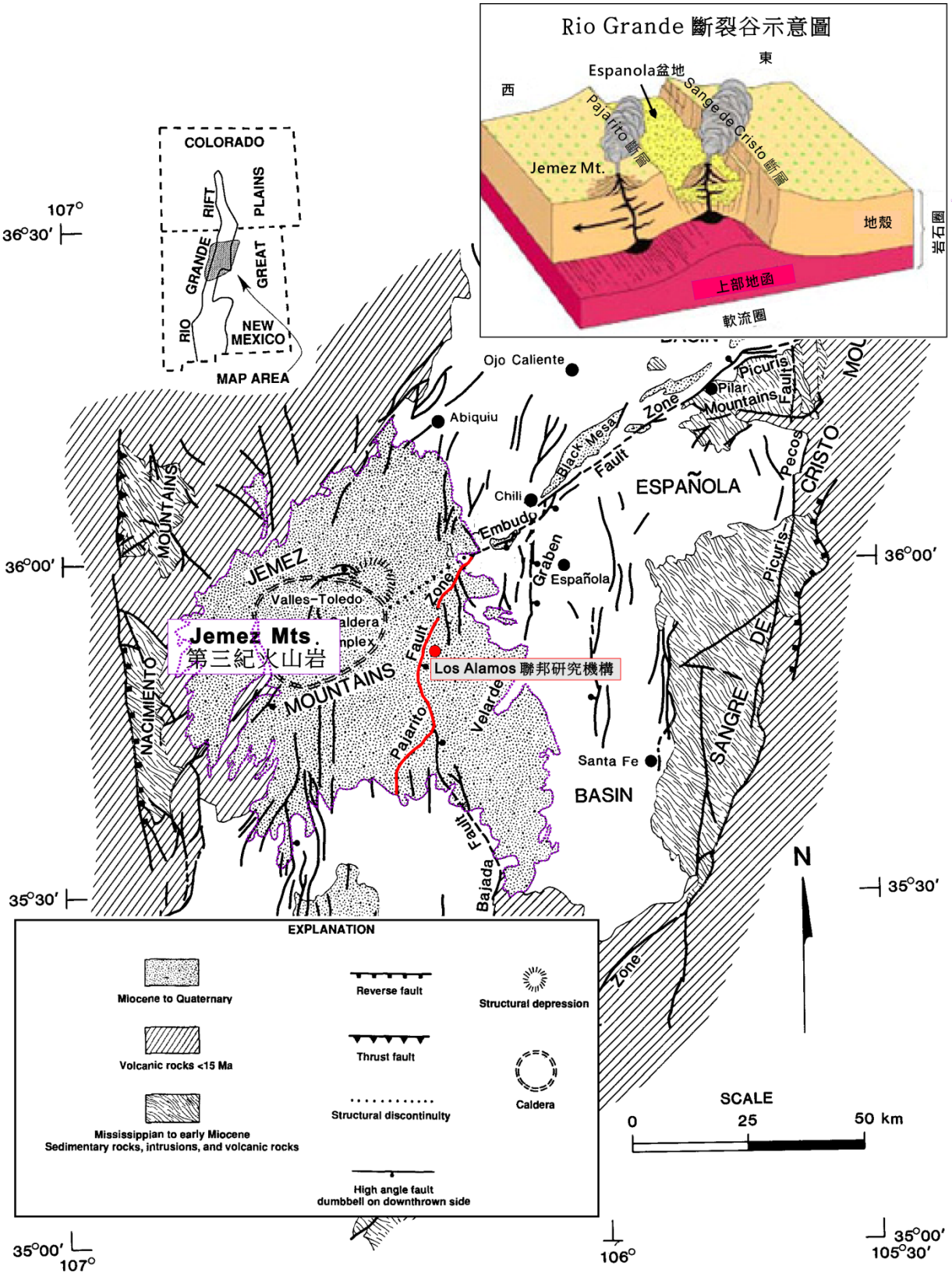


圖 2-1-15 Rio Grande 斷裂谷的 Jemez 山脈及 Espanola 盆地之位置圖(修改自 Aldrich and Dethier, 1990)

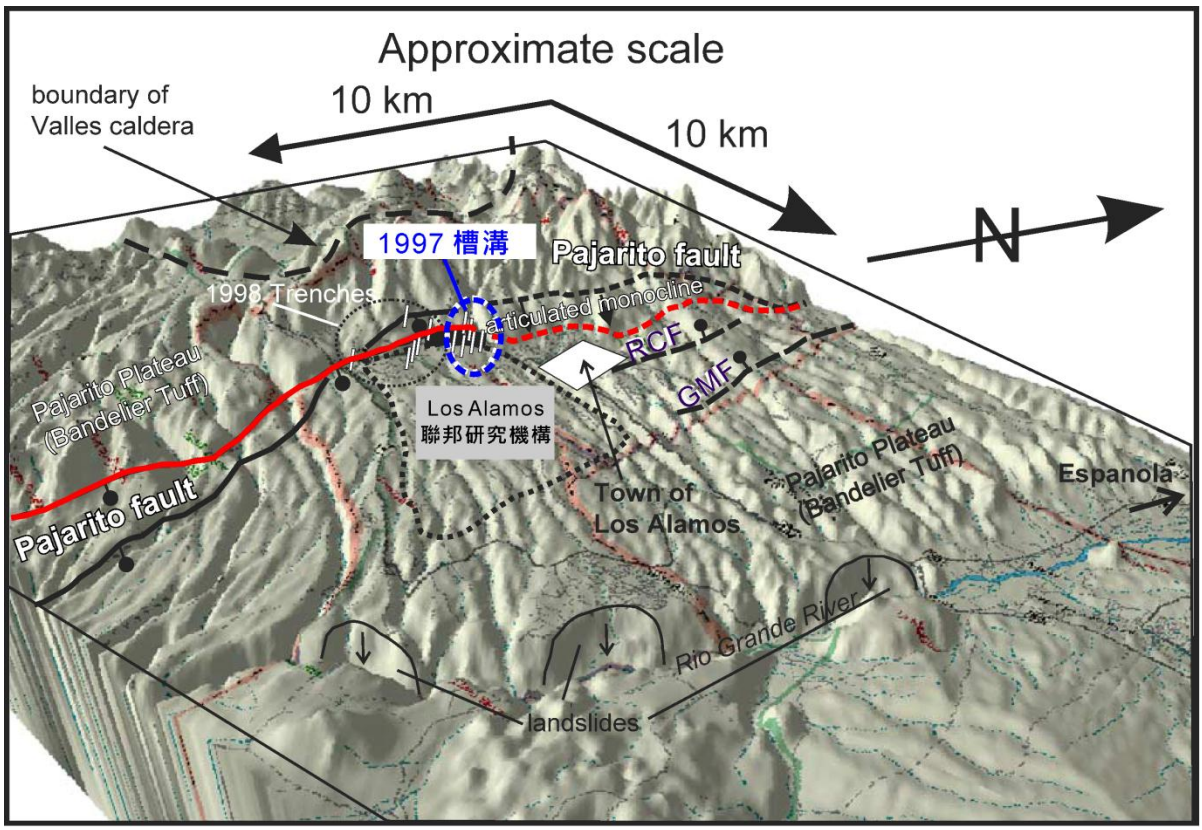


圖 2-1-16 Pajarito 高原鄰近 Los Alamos 美國聯邦研究機構的數位地形圖(修改自 McCalpin, 2005)

ii. Pajarito 斷層系統

Pajarito 斷層在 Pajarito 斷層系統中為最長,且具最大的位移量,斷層的中段對 Bandelier 凝灰岩所造成的地形崖，可達 180 公尺高。所謂的 Pajarito 斷層系統，除 Pajarito 斷層外，包括 Rendija Canyon 斷層(RCF)及 Guaje Mountain 斷層(GMF)，約 41 公里長，為南北走向（Olig et al., 1996），見圖 2-1-17。三條斷層於地表皆非僅為一條連貫的斷層跡，Pajarito 斷層往南及往北延伸皆分叉為二,特別是往北的開岔,漸轉變為鉸接式的單斜構造(anticulated monocline),Rendija Canyon 斷層和 Guaje Mountain 斷層(GMF)則分別由不連續的數段所構成，兩斷層皆向西傾與 Pajarito 斷層相反，且長度相當短了許多，因此被認定為附屬於 Pajarito 斷層的反傾斷層(antithetic fault)。

為評估這斷層系統對 Los Alamos 聯邦研究機構的可能威脅，從 1990 到 2005 年展開了一系列地質調查（Gardner, 1990; Wong, et al., 1995; Kolb et al., 1994, 1995 unpublished report; McCalpin, 2005），其中包括橫跨各斷層槽溝的開挖，因此有更小尺度更仔細的垂直剖面的

資料。底下說明各斷層的構造型式並選取兩個槽溝說明細部的構造現象。圖 2-1-18(A)為橫跨 1997 年挖掘槽溝位址的剖面示意圖，圖中意示 Pajarito 斷層在此地點，寬約 1 公里，其實為一組以高角度正斷層為主的構造所組成的斷層帶，其中的正斷層傾面有向西的也有向東的。圖 2-1-18(B)為槽溝 97-3 南牆的剖面，Bandelier 凝灰岩與崩積層以斷層相接觸，往西於崩積層裡 6 公尺寬範圍，出現數組高角度的斷層，斷層向上分岔現象明顯，且切穿不同的崩積層單元，可能代表數次的斷層活動。相較下，Rendija Canyon 斷層及 Guaje Mountain 斷層的構造則簡單些，但也非單純地僅為一斷層面，圖 2-1-19 為 Rendija Canyon 斷層的一開挖槽溝，垂直剖面上，可見一傾角約 70 度向西的正斷層，但也不乏其他相對錯距較小的高角度斷層。

綜合所有的資料，Pajarito 斷層造成的分隔西側 Jemez 山脈及東側的 Pajarito 高原的地形崖之高差，此地形崖約為 1.2 百萬年(Bandelier 凝灰岩的形成年代)前至今，由該斷層錯動加上侵蝕風化作用所形成。Pajarito 斷層推估所得的斷層最大垂直位移為每年 0.13 公釐，斷層長期滑動速率為每年 0.1 公釐，最近一次活動時間為 2-4 萬年前，30 萬年間的活動的週期為 2-4 萬年。相較於其附屬的兩斷層，Rendija Canyon 斷層推估所得最大垂直位移為每年 0.03 公釐，斷層在過去的 1.2 百萬年的長期滑動速率為每年 0.02 公釐，最近一次活動時間為 8 千年前(由碳十四定年所得)或 2.3 萬年前(由光螢光定年所得)；Guaje Mountain 斷層推估所得最大垂直位移為每年 0.03 公釐，斷層在過去的 1.2 百萬年的長期滑動速率為每年 0.01 公釐，最近一次活動時間可能界於 4 到 6 千年前之間。換言之，Pajarito 斷層、Rendija Canyon 斷層、Guaje Mountain 斷層皆屬活動斷層，然每次斷錯造成的可能滑動量以 Pajarito 斷層最大，但從各別資料中也發現，各斷層最近一次的錯動時間並不一致，可能隱含著三條斷層在不同的地質事件中各自活動，或並非總是一起活動。

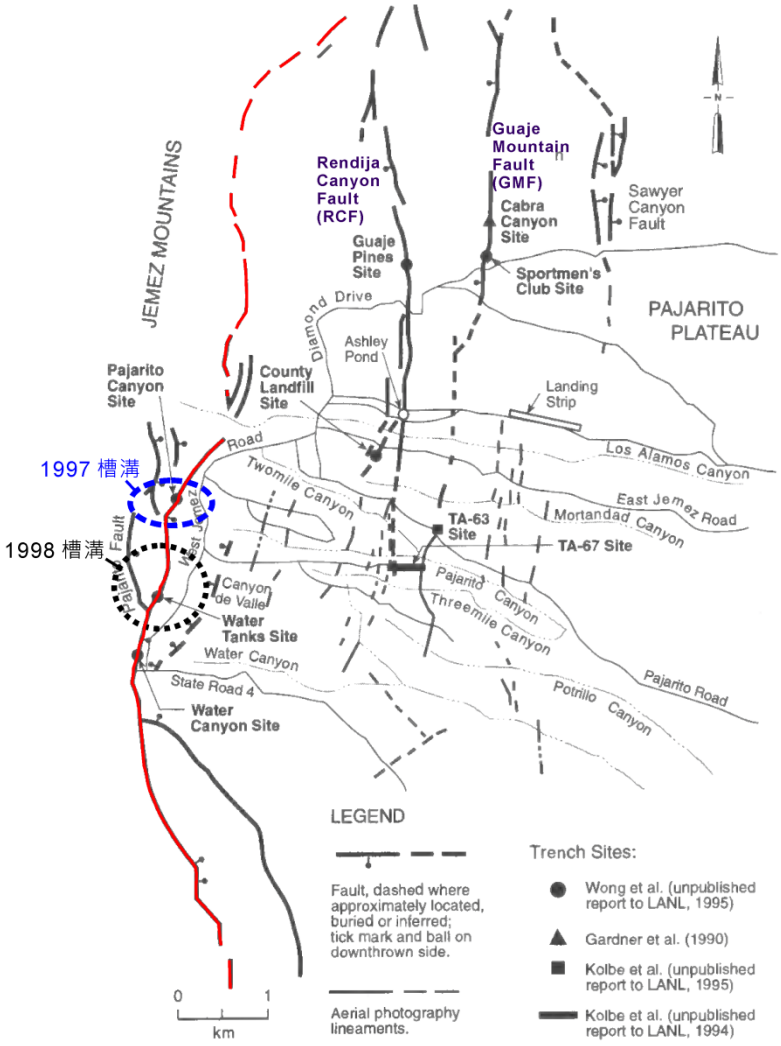
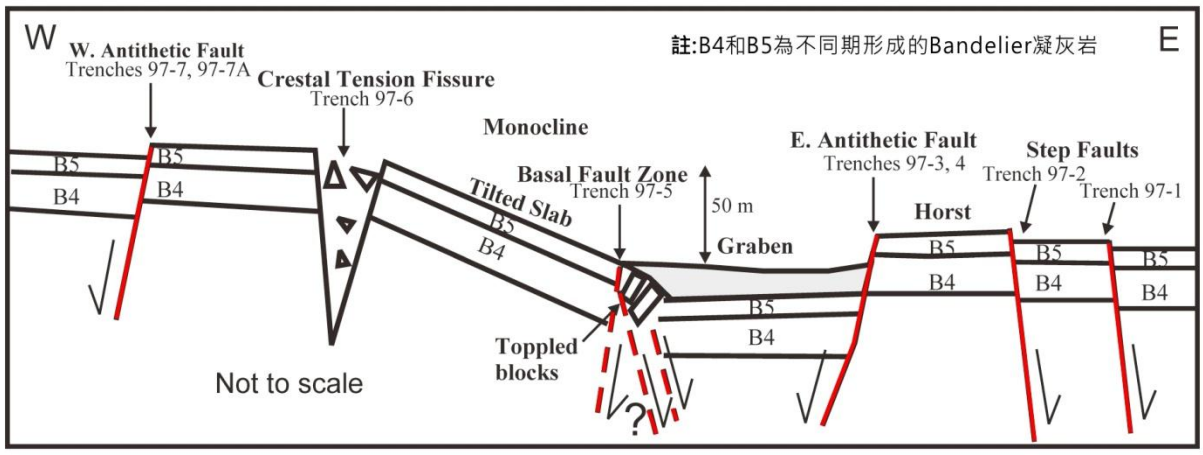


圖 2-1-17 Pajarito 斷層系統的斷層圖及開挖槽溝位置(修改自 Kelson et al., 1996)

A.橫跨Pajarito斷層帶的示意剖面及1997年開挖槽溝之相對位置



B.槽溝97-3南牆剖面

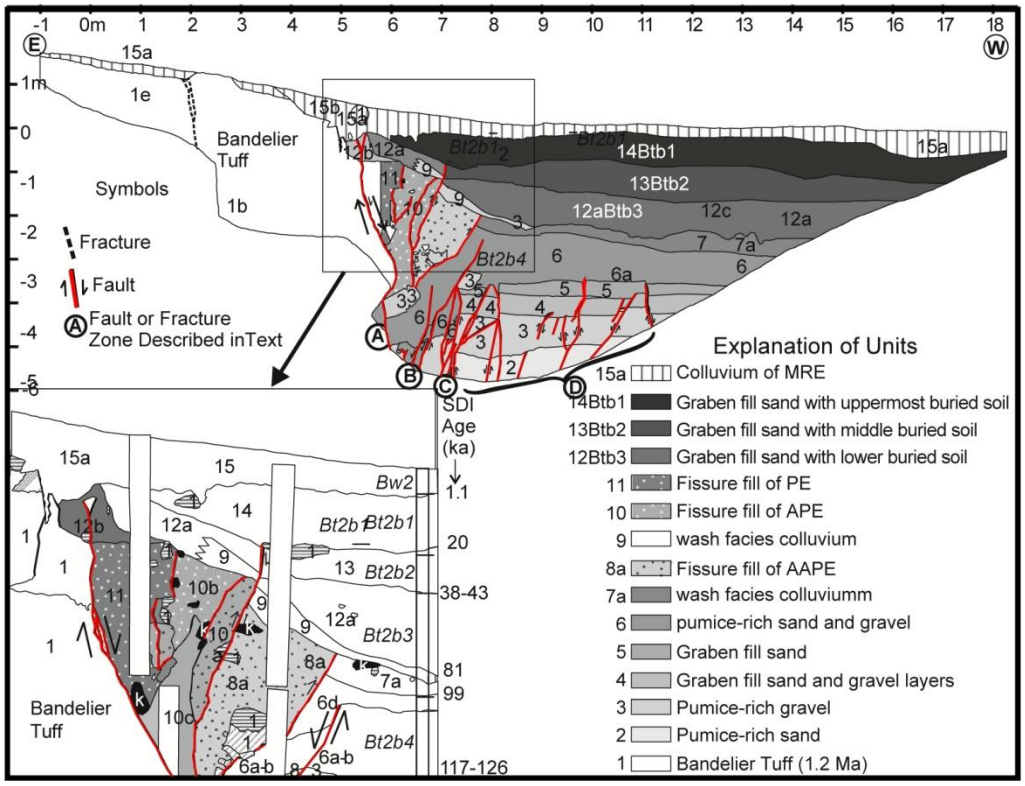


圖 2-1-18 Pajarito 斷層帶的構造現象(修改自 McCalpin, 2005)

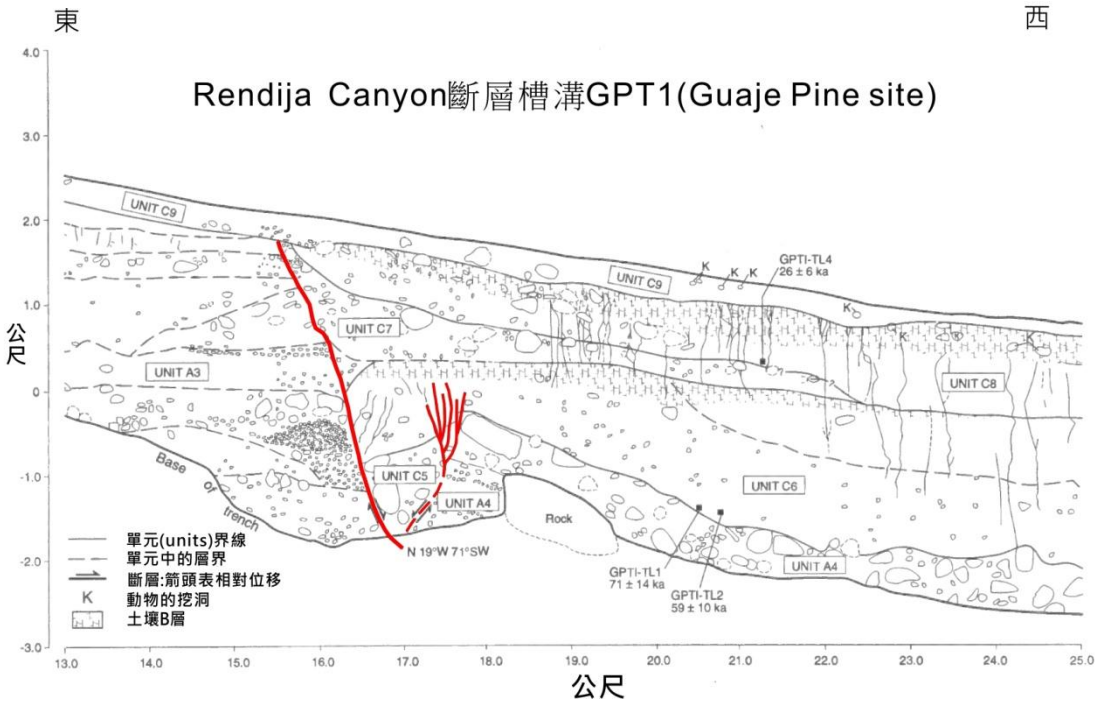


圖 2-1-19 Pajarito 斷層系統中的 Rendija Canyon 斷層之 Guaje Pine 槽溝(GPT1)。(修改自 Kelson et al., 1996)

2.1.5. 國內外禁限建案例探討

參考地調所(2000)大里市、霧峰鄉地表破裂及露頭點位置，斷層自民房下方經過，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，如圖 2-1-20 所示，於 2011 年現調，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，房舍整體上台約 1 公尺，並於房舍前後採不同支撐工法，前後期比較影像如圖 2-1-21 所示。

觀察雖然美國加州政府在 1971 年的 San Fernando 地震災害後，隔年迅速制定頒布法律條文限制活動斷層兩側的土地開發利用。但在那之後的這四十年間也陸續地進行條文適用性的討論、條文的闡釋及修正等等(Sexton, 2008；Bryant, 2010)。並善盡告知的義務，清楚標示斷層跡橫越都市的位置(USGS, 2008)，如圖 2-1-22 為柏克萊區域內 Hayward 斷層跡位置，斷層亦橫跨加州大學柏克萊分校，在歷經 1868 年的地震過後，1870 年起校園內的所有建築皆採以抗震設計，並將斷層引致地表破裂區域明確告知民眾，如圖 2-1-23 所示，提高民眾對活動斷層的認知及警覺心。

或許這樣的退縮距離(setback)對加州地區的垂直走向斷層適用，但對其它不同的斷層類型可能並不盡然，其實美國的學者及政府也從 Landers 的地表變形發現 15 公尺的退縮距

離或許並不妥當。再者，因為多半的錯動量集中在主要的破裂或變形帶上的現象，也使得退縮距離的政策出現另一個替代方式的呼聲，即除主要的破裂或變形帶外，其餘的地震變形影響區內的建設則以工程的強化來減低可能的地震災害(Treiman, 2010)。

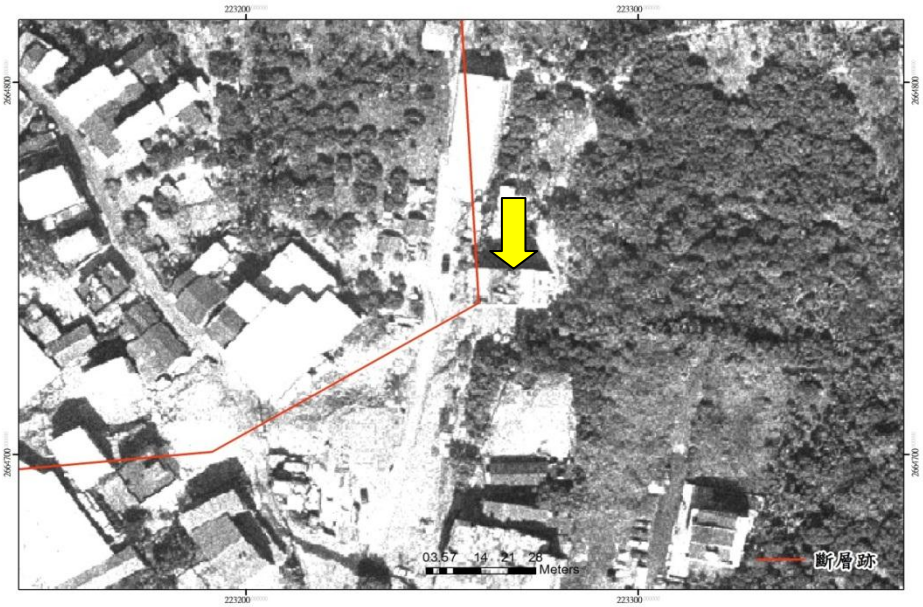


圖 2-1-20 車籠埔斷層跡經過房舍(箭頭處)轉向自西南方



2000 年車籠埔斷層自健行路民房下方經過，造成民房損毀情形。



2011 年民房現況



民房整體抬升約 1 公尺



民房後方僅以 H 型鋼支撐

圖 2-1-21 斷層錯動引致房舍位移及民眾復原現況

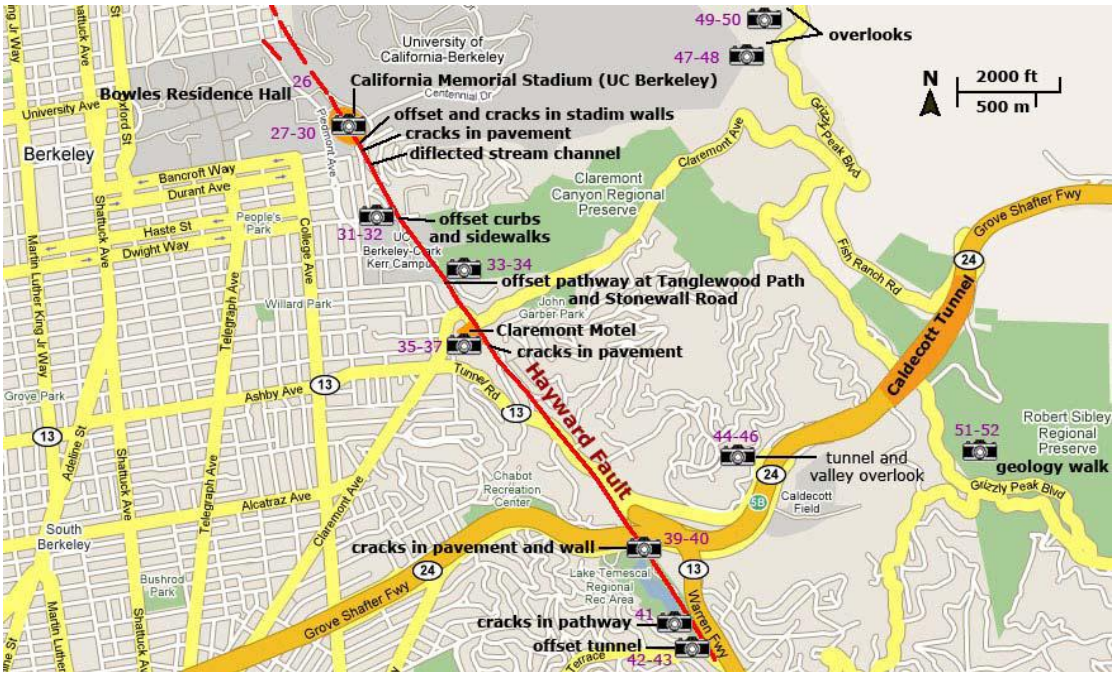
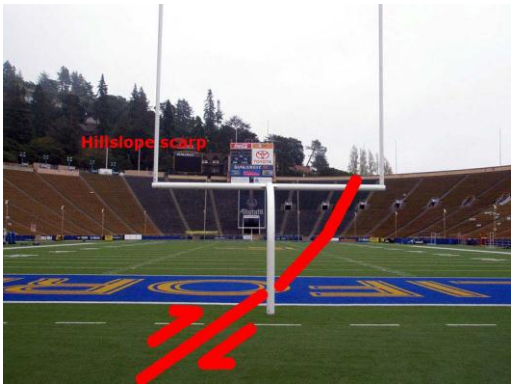


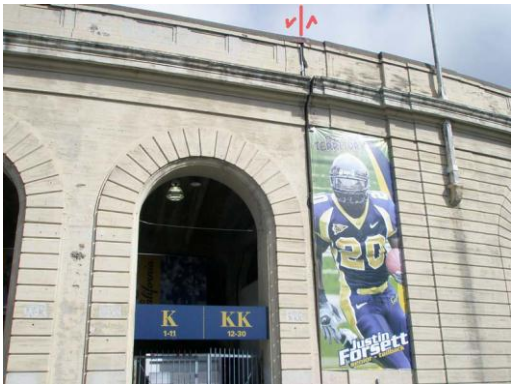
圖 2-1-22 加州柏克萊區域 Hayward 斷層跡。紫色編號為相片位置



第 27 號



第 29 號



第 30 號



第 37 號

圖 2-1-23 加州柏克萊區域 Hayward 斷層引致地表破裂(下方編號對照圖 2-1-22 位置)

2.2. 現地查核

2.2.1. 鑽探資料彙整

大地工程鑽探及試驗之主要目的，是為了取得地層分佈資料，土壤或岩石強度等資訊，以利土木工程結構物之基礎設計與施工。就本計畫而言，由於活動斷層錯動而導致近地表區域變形之特性亦受到地層分佈以及其物理及工程性質之影響，因此，也需要利用大地工程鑽探以及試驗等資料來對研究區域做一分析，針對鑽探所得土層資料及樣本，並利用現地試驗或是室內試驗結果，提出簡化土層建議、模型分析可用之工程力學參數以及相關參數之統計資料，以得到在給定土層狀況下，考慮活動斷層錯動在地表附近之變形特性。另外，大地工程鑽探與地質鑽井最大不同之處，在於大地工程鑽探之過程，可視土層特性於現地進行標準貫入試驗等現地實驗，另外，也可視情形取得劈管樣本(砂性土層)，或是薄管樣本(黏性土層)以利室內試驗之進行。

有關於土壤或岩石之基本物理性質，一般包括含水量、比重、孔隙比、粒徑分佈、塑性指數等，可做為地層簡化分層之參考，並由基本物性推求土層之單位重等參數，以利分析之進行。有關於力學性質方面，包括摩擦角、凝聚力、單壓強度等，可由常見之力學試驗求得，如直剪試驗、三軸試驗、無圍壓縮試驗等，由以上之力學試驗，亦可同時求取試驗土樣之一般物性。就上述之室內力學試驗而言，直剪試驗為土壤或岩石在給定數個(通常為三個)正向應力(normal stress)之狀況下，分別求取其對應之尖峰剪應力或殘餘剪應力，並求取其迴歸線之斜率以及與剪應力軸之截距，做為土壤或岩石之摩擦角正切值(tangent)及凝聚力。三軸試驗為土壤或岩石在給定圍壓(confining pressure)下，求取其對應之軸向尖峰應力值，並利用圍壓及對應之軸向尖峰應力值求取土壤或岩石之摩擦角正切值(tangent)及凝聚力。無圍壓縮試驗為直接將土壤或是岩石試體放上載台，並施加軸向應力直到破壞為止，此一軸向應力即為試體之單壓強度，由於此試驗屬於快剪試驗，所得單壓強度之一半為試體之不排水剪力強度，對應之不排水摩擦角為零。

就現地試驗而言，一般常見有標準貫入試驗(Standard Penetration Test, SPT)以及圓錐貫入試驗(Cone Penetration Test, CPT)，標準貫入試驗之進行方式為利用重 64 公斤之落槌，並以 76 公分之落距以自由落體方式向下敲擊取樣管，並計算使得取樣管向下貫入土壤 15 公

分之敲擊次數，共進行三次計 45 公分，並合計後二次之敲擊次數，此一次數稱為標準貫入試驗 N 值(SPT-N)，可做為評估現地土層之緊密程度或強度之依據，對於砂性土壤來說，當 SPT-N 值大於 30 時，其相對密度為緊密至非常緊密，對應之摩擦角常大於 35 度；而對於黏性土壤而言，一般較少利用 SPT-N 值推估相關力學參數，主要原因在於黏性土壤在受到快速載重之下，常因激發之超額孔隙水壓來不及消散，導致其有效應力大幅下降，而使得量測到之標準貫入試驗值偏低，因此，雖然經驗式中也有關於黏性土壤 SPT-N 值推估相關土壤力學參數，但使用上應較為小心。文獻中常提到可利用土壤之一般物性參數或是現地試驗標準貫入試驗值推估土壤力學參數，以下就本研究中參考使用之經驗公式做一簡略之說明：

A. 就黏性土壤而言：

以塑性指數(Plasticity Index, PI)以及土壤之預壓密應力(σ_p')推估土壤不排水剪力強度，如下式所示：

$$S_u = (0.11 + 0.0037 \cdot PI) \cdot \sigma_p'$$

對於黏性土壤之不排水剪力強度而言，亦有經驗公式配合標準貫入試驗值來推估，經驗公式如下：

$$S_u = 29.4(N)^{0.72} \ \text{(kPa)}$$

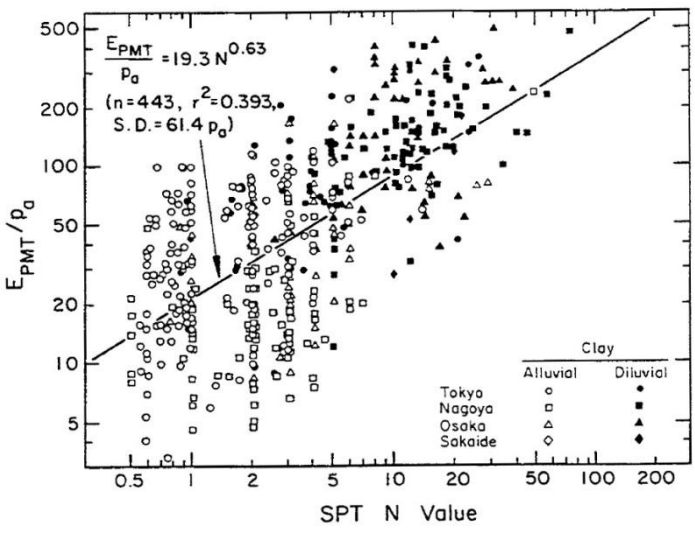


圖 2-2-1 以標準貫入試驗值推估黏性土壤彈性模數

對於黏性土壤之彈性模數而言，如圖 2-2-1 所示，其與標準貫入試驗值有一約略之相關函數，Ohya 提出以 SPT-N 值推估黏性土壤之彈性模數如下式所示：

$$E = 1955(N)^{0.63}\ (\text{kPa})$$

B. 就砂性土壤而言：

以 SPT-N 推估土壤摩擦角以及相對密度，可參考表 2-2-1，而由於不同文獻中對於標準貫入試驗值對應之摩擦角有不同之建議，因此亦列於表中((a)及(b)為來自不同文獻)供本計畫參考。另外可參照圖 2-2-2 利用土層所在位置之有效覆土應力(σ_{v0}')以及其對應之標準貫入試驗值(N)，查詢或計算相對應之摩擦角(ψ)，圖 2-2-2 是利用 Schmertmann 提出之經驗式繪製而成，經驗式如下式所示(Pa=101.3 kPa)：

$$\tan\phi \approx \left[\frac{N}{(12.2 + 20.3\frac{\sigma_{v0}'}{p_a})}\right]^{0.34}$$

表 2-2-1 標準貫入試驗值與相對密度、摩擦角對照表

N Value (blows/ft or 305 mm)	Relative Density	Approximate $\bar{\phi}_{tc}$ (degrees) (a)	(b)
0 to 4	very loose	< 28	< 30
4 to 10	loose	28 to 30	30 to 35
10 to 30	medium	30 to 36	35 to 40
30 to 50	dense	36 to 41	40 to 45
> 50	very dense	> 41	> 45

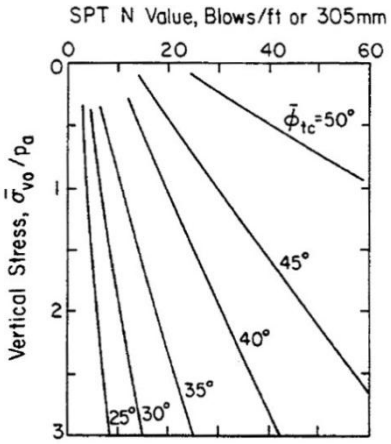


圖 2-2-2 標準貫入試驗值與摩擦角關係圖

另外，以 SPT-N 推估砂土彈性模數方面，由於模型分析內除了土層之力學參數外，亦需要描述其受力變形之參數，因此也以室內實驗或是標準貫入試驗 N 值搭配經驗公式推估，如表 2-2-2 所示：

表 2-2-2 砂層之正規化彈性模數對照表

Consistency	Normalized Elastic Modulus, E_d/p_a	
	Typical	Driven Piles[a]
loose	100 to 200	275 to 550
medium	200 to 500	550 to 700
dense	500 to 1000	700 to 1100

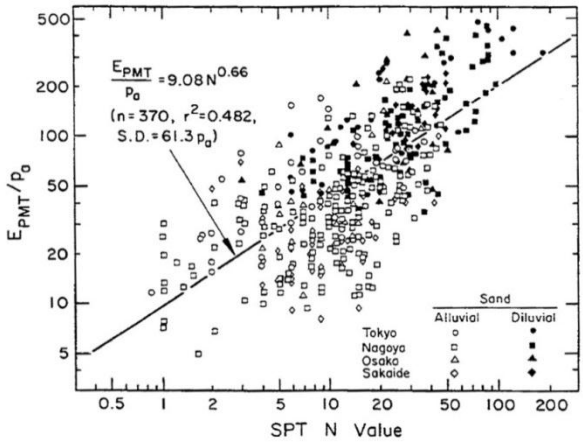


圖 2-2-3 標準貫入試驗值與正規化彈性模數關係圖

另外，砂土之彈性模數亦可利用標準貫入試驗值，以經驗公式推估其值，如下式以及圖 2-2-3 所示，其中 N_{60} 代表標準貫入試驗 N 值對機具型式校正後之值，詳情可參閱土壤力學相關書籍。

$$E = 920(N)^{0.66}\ (\text{kPa})$$

$E = 506.5(N_{60})\ (\text{kPa})$ (僅適用於含細粒料之砂土)；或

$E = 1013(N_{60})\ (\text{kPa})$ (僅適用中等緊密純砂土)；或

$E = 1520(N_{60})\ (\text{kPa})$ (僅適用緊密純砂土)

另外，描述土壤變形之另一個重要參數為波松比(Poisson's Ratio)，波松比對土壤而言，為進行三軸試驗(或類似試驗)中，量測到之體積應變與軸向應變之函數，或是徑向應變(ε_r)與軸向應變(ε_a)之比，如下式所示，由於相較於彈性模數來說，波松比之變化較小，因此，可參照如表 2-2-3 之建議值做為模型分析之用。

$$\nu = -\partial\varepsilon_r / \partial\varepsilon_a$$

表 2-2-3 不同土壤之波松比

Soil	Drained Poisson's Ratio, ν_d
Clay	0.2 to 0.4
Dense sand	0.3 to 0.4
Loose sand	0.1 to 0.3 .

而由於經驗式之建立常需要大量的資料庫以求得最佳迴歸線，因此，上述經驗式之使用上，需注意其適用範圍，另外，由圖 2-2-1 或圖 2-2-3 亦可看出，即使利用現有資料得以求出相關之經驗公式，其相關係數有時會相當低，代表使用經驗公式所求得之參數，其變異性可能會很大，在此狀況下，對於所推估之參數，應該在合理的範圍內先行檢視，並與其他文獻互相比較，以使參數選取上更為多樣化。

2.2.2 鑽探資料統計及空間變異分析

由於土壤或岩石之物理性質或力學參數具有變異性，因此，就所蒐集到的資料或是推估之參數而言，均可利用統計方法找出如平均值、標準差以及變異係數等描述其變異性之參數，若資料數量夠多，則可以利用常見之機率密度函數(Probability Density Function, PDF，如常態分佈或對數常態分佈等)來模擬真實資料，以利後續模型分析時，可以用來考慮土壤或岩石參數值之變異特性。一般土壤或岩石之工程參數或是基本物性指數等可假設為常態分佈或對數常態分佈，如圖 2-2-4 所示，為標準貫入試驗值於山腳斷層沿線之仙渡超高壓變電所興建基地所取得之鑽探資料整理而得，由圖 2-2-4 可以看出此處之標準貫入試驗值分佈約略為一對數常態分佈，本研究中，將先以常態分佈或對數常態分佈做為判斷

土壤資料分佈之基本函數，有關於常態分佈以及對數常態分佈之機率密度函數，謹列於下方以供參考：

$$f(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\exp[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}]$$ (常態分佈，其中 μ 及 σ 為樣本之平均值與標準差)

$$f(x)=\frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma^2}}\exp[-\frac{(\ln x-\mu)^2}{2\sigma^2}]$$

(對數常態分佈，其中 μ 及 σ 為樣本取自然對數後之平均值與標準差)

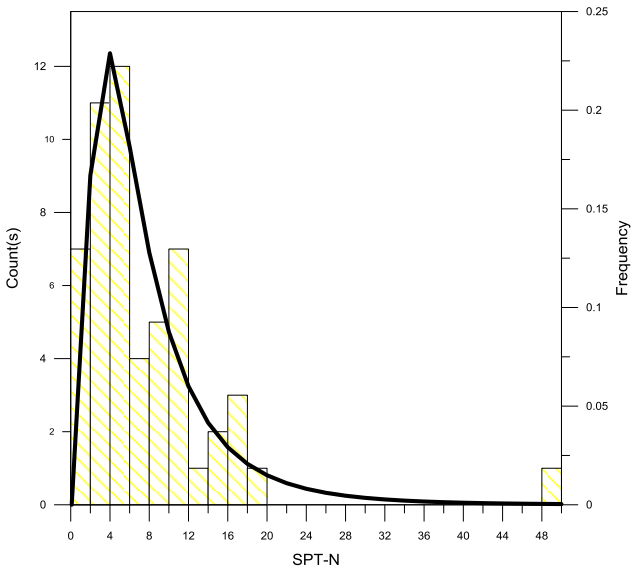


圖 2-2-4 標準貫入試驗值直方圖與分佈頻率圖

另外，由於進行統計分析常需要較大量之大地工程鑽探資料，因此，若無實際資料的話，則如圖 2-2-4 之資料分佈狀況將無法順利繪製，此時可以利用常見土壤參數之變異係數(如表 2-2-4 所示)，先利用現有資料推估分析參數之平均值，再利用變異係數計算對應之標準差，進一步假設欲分析之參數分佈(如前述之常態分佈或對數常態分佈)，再利用可靠度分析方法(如蒙地卡羅分析法)，找出某土壤參數所對應分析結果之範圍 (如斷層錯動對地表變形之影響範圍)。

表 2-2-4 常見土壤力學及一般物性參數變異係數

土壤性質	變異係數 (%)
單位重	3
摩擦角	6-10
不排水剪力強度	10-40
孔隙比	~25
液性限度	~25
塑性限度	~17

另外，有關於大地工程相關參數的空間變異性方面，由於相臨兩點之距離(τ)愈長時，其資料點間之相關性會愈低，因此，利用此一特色，亦可對於現有資料進行空間變異性之分析，而空間變異性之變化可利用自相關函數(autocorrelation function)或是半變異量函數(semivariogram)來描述其變化；就自相關函數而言，常見之函數有單指數函數(single exponential)、平方指數函數(squared exponential)等，而函數中之變數(λ、a、b、c 或 d) 會與關聯性長度(scale of fluctuation)有關，當兩相臨資料點相距超過關聯性長度時，即可假設其相關性較低。常見自相關函數之公式以及圖形可見圖 2-2-5。

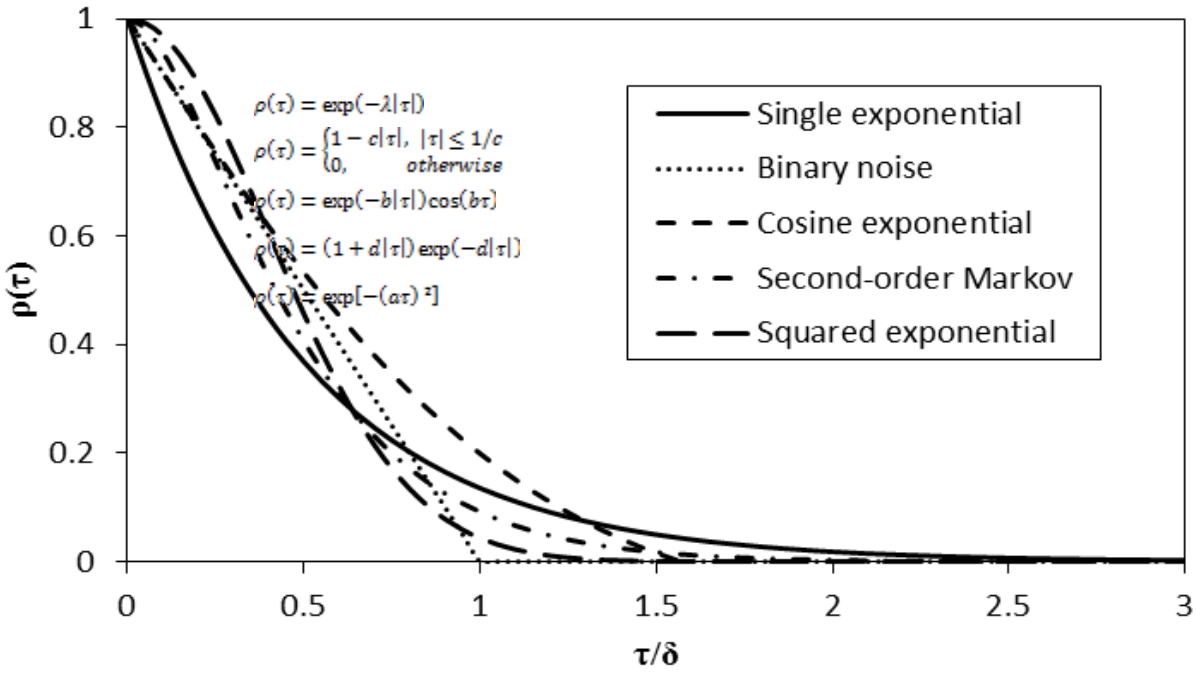


圖 2-2-5 自相關函數類型

2.3. 砂箱實驗

2.3.1. 1g 砂箱實驗

i. 實驗模型設計

本研究之 1g 砂箱實驗所使用之砂箱尺寸為長度 100 公分、寬度 20 公分、高度 60 公分。當進行不同斷層傾角之物理砂箱試驗時，為減少變因的情形下，控制了基盤之垂直位移速率，將高傾角 60 度與低傾角 30 度之垂直位移速率控制為 2.9cm/min。此一垂直位移速率為經過一連串之試驗過程中，較適做後續處理之位移速率，並不能代表現地斷層錯移之速率。若物理砂箱試驗之位移速率太快，上覆砂土之變形行為過程無法得到有效之連續照片，在後處理部份將無較完整之資料進行分析。

ii. 材料性質

本研究之1g砂箱實驗中所使用的砂土為越南石英砂，由基本物性實驗推得平均砂土比重Gs為2.65，土壤單位重為15.7kN/m^3，並控制其相對密度為55%，孔隙比為0.68。相關基本物性及力學性參數，參考鍾春富等(2005)之資料，作為本研究中所使用之參數。另外，為方便觀察砂土層受斷層錯移後之變形行為，於實降越南石英砂的過程中，每間隔兩公分越南石英砂則鋪設約1mm之薄層染色砂。染色砂之準備程序為利用越南石英砂加入水性色膏，利用適當比例之石英砂、藍色色膏及水三者調配而成，經過一天高溫烘乾後靜置冷卻，最後利用二十號篩網 (0.84mm)過濾，以控制染色砂之粒徑與越南石英砂之粒徑相近，降低染色砂對砂箱試驗結果之影響。

iii. 實驗規劃與成果

利用 1g 模型試驗成果推估及探討原型斷層錯動，造成地表覆土變位及影響範圍，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，但不論是國內外仍然有相當好的研究成果。蔣佳興(2006)利用如圖 2-3-1 所示正斷層砂箱試驗進行 1g 模型試驗。圖中定義模型試體厚度為 H，而上盤下陷垂直距離為ΔH，本研究中稱ΔH/H 為錯

移率，可描述斷層發展的程度；W 則代表斷層上盤尖端投影至地表之處，與地表剪切線之水平距離。表 2-3-1 列出其研究所進行之四組不同條件之正斷層試驗。圖 2-3-2 至圖 2-3-5 則分別代表四組不同試驗之結果，比較第 1、2 組實驗可以看到，當斷層傾角較高時，剪切帶僅發展於下盤，當斷層傾角較低時，剪切帶除在下盤發展之外，也會在上盤發展出反向斷層(Antithetic Fault)，兩條剪切帶所夾之區域為正斷層之地塹構造，此區域內之砂土類似剛體向下運動，並伴隨著些許轉動現象。再比較第 1、3、4 組實驗可見低覆土試驗下，剪切帶僅於下盤發展，高覆土試驗中，於上盤及下盤皆有剪切帶發展。

另外，陳師賢(2007)之研究利用正斷層砂箱進行 1g 模型試驗，實驗包含三組有一層生長層之正斷層，說明如下：

I. 斷層傾角 60 度，有生長層，分兩階錯動，即生長斷層；第一次錯動 5cm，第二次錯動 1cm。(圖 2-3-6)

II. 重複性試驗。(圖 2-3-7)

III. 重複性試驗。(圖 2-3-8)

由陳師賢(2007)之實驗結果可以歸納出當正斷層錯動時，第一條剪切帶會比較陡直，第二條或第三條剪切帶相較於第一條剪切帶比較靠近下盤，因此傾角比較緩；而當正斷層含有生長層時，最先發展出來的剪切帶會沿原有的剪切帶中最靠近下盤的那一條繼續向上發展，並且剪切帶發展至地表所需之基盤錯移率(ΔH/H)變小。

表 2-3-1 不同條件之正斷層試驗(蔣佳興，2006)

正斷層試驗	試驗條件
第 1 組	斷層傾角60°，上覆砂土層為 20cm
第 2 組	斷層傾角30°，上覆砂土層為 20cm
第 3 組	斷層傾角60°，上覆砂土層為 30cm
第 4 組	斷層傾角60°，上覆砂土層為 40cm



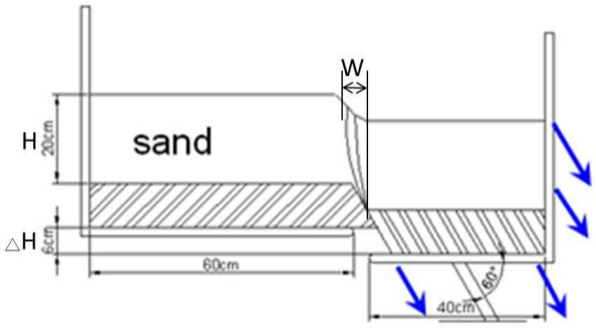
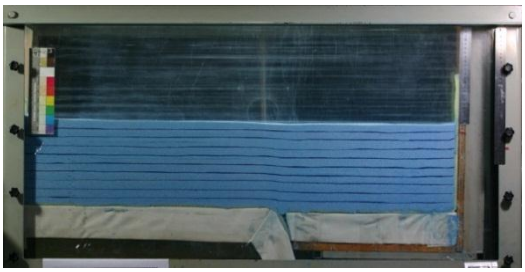
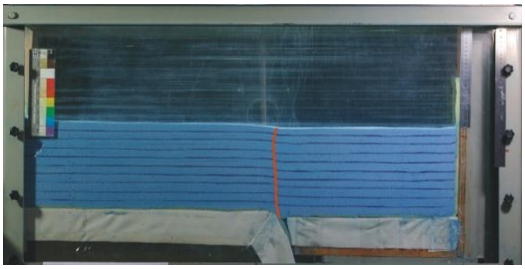


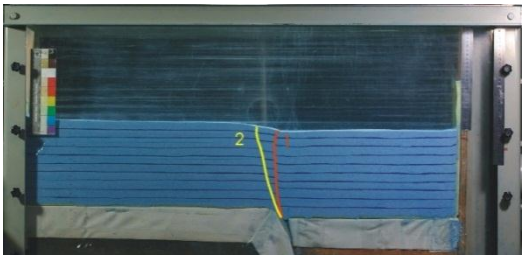
圖 2-3-1 1g 正斷層砂箱



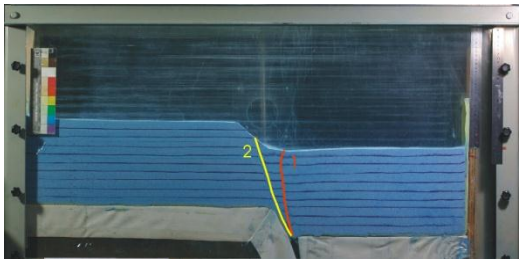
ΔH/H = 0.5%



ΔH/H = 2.8%

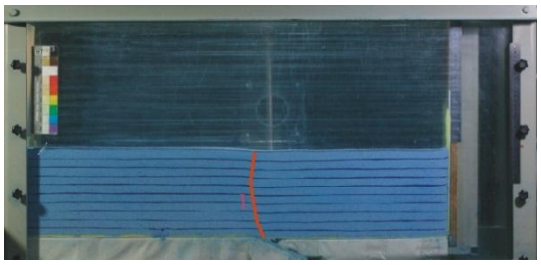


ΔH/H = 5.8%

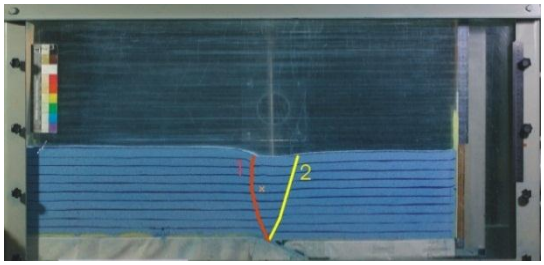


ΔH/H = 28.9%

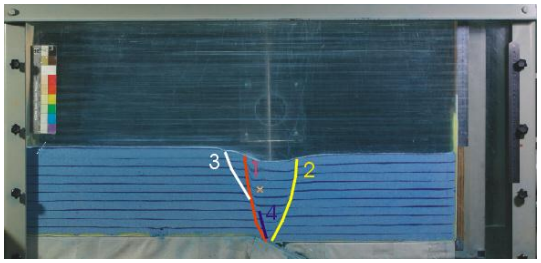
圖 2-3-2 斷層傾角 60^{o}，上覆砂土層為 20cm 之正斷層實驗結果



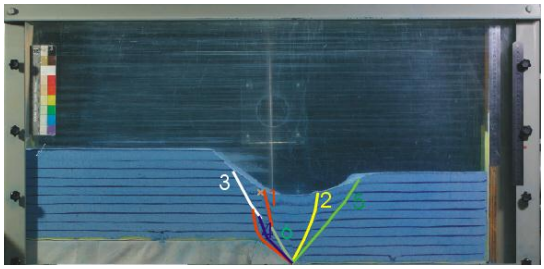
ΔH/H = 1.85%



ΔH/H = 4.8%

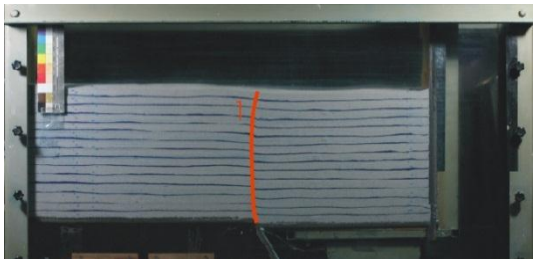


ΔH/H = 6.3%

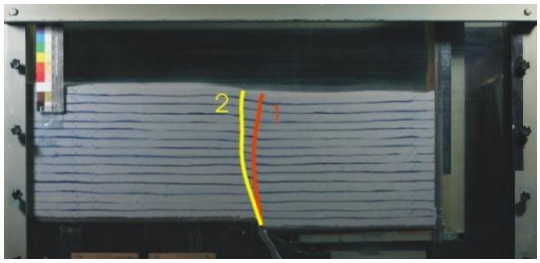


ΔH/H = 25.85%

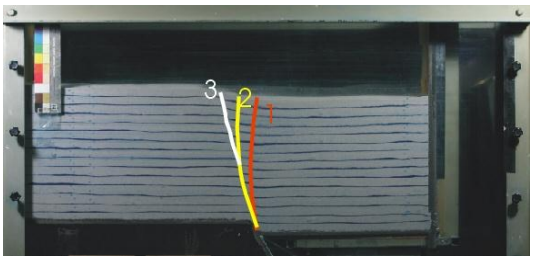
圖 2-3-3 斷層傾角 30^{o}，上覆砂土層為 20cm 之正斷層實驗結果



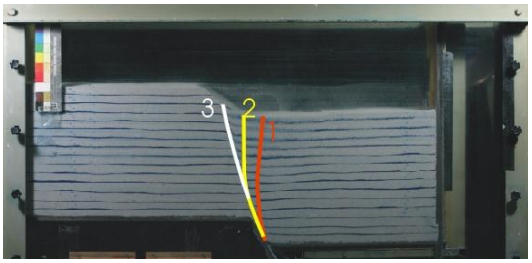
ΔH/H = 4.53%



ΔH/H = 5.57%

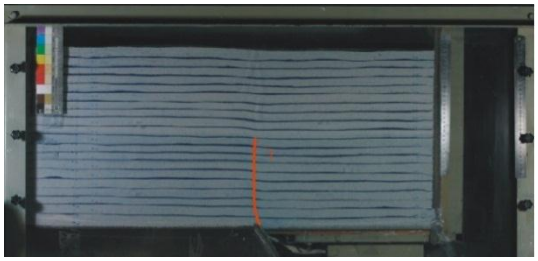


ΔH/H = 8.10%

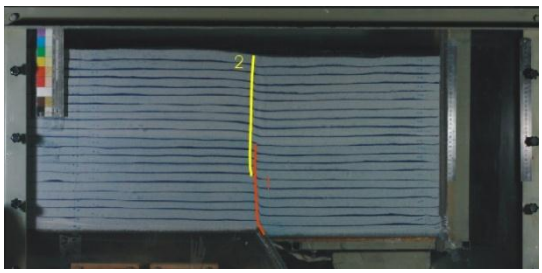


ΔH/H = 18.7%

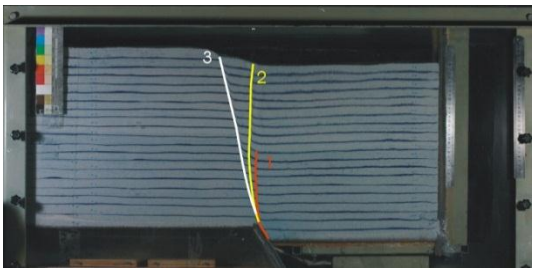
圖 2-3-4 斷層傾角 60^{o} ，上覆砂土層為 30cm 之正斷層實驗結果



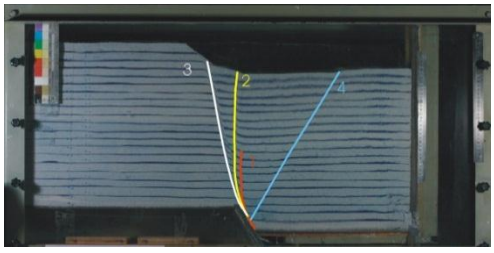
ΔH/H = 0.92%



ΔH/H = 3.04%

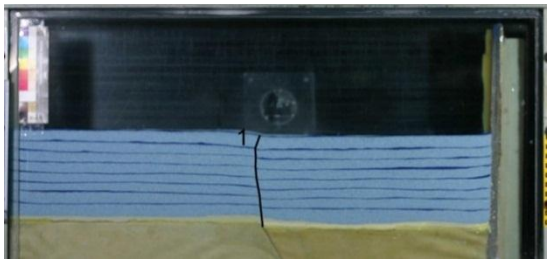


ΔH/H = 5.43%

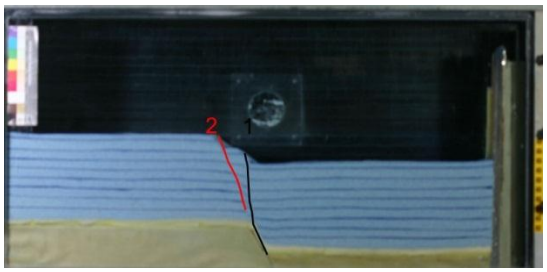


ΔH/H = 14.73%

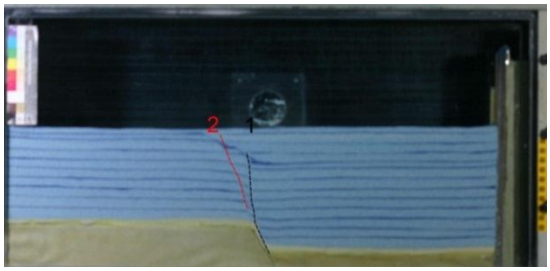
圖 2-3-5 斷層傾角 60^{o}，上覆砂土層為 40cm 之正斷層實驗結果



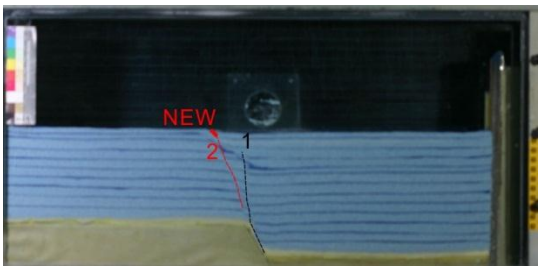
(a) ΔH/H=8%第一條剪切帶發展至地表



(b) ΔH/H=20%

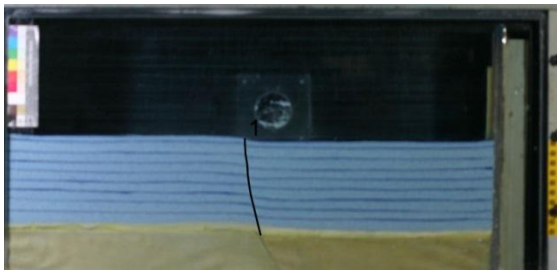


(c)鋪上生長層

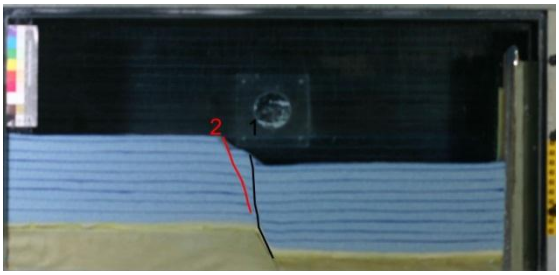


(d) ΔH/H=1.8%第一條剪切帶發展至地表

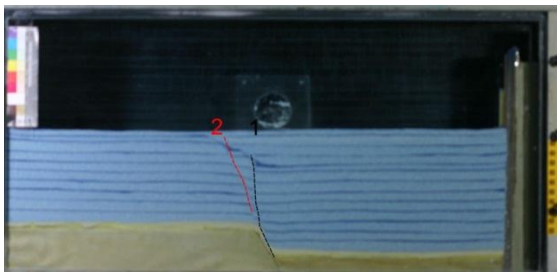
圖 2-3-6 一層生長層之正斷層實驗結果



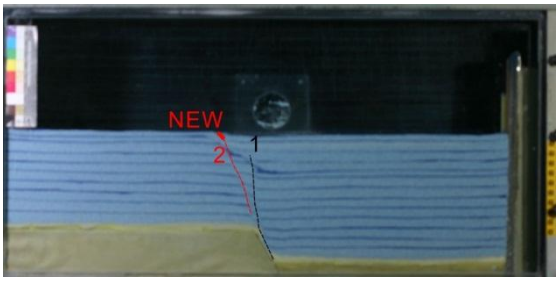
(a) ΔH/H=7%第一條剪切帶發展至地表



(b) ΔH/H=20%



(c)鋪上生長層

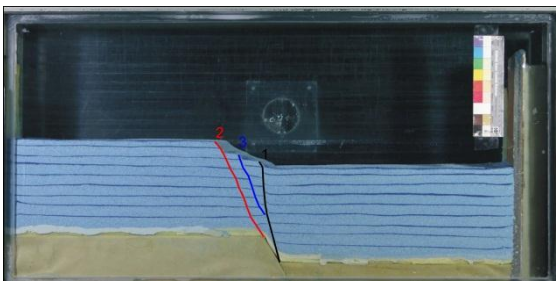


(d) ΔH/H=2%第一條剪切帶發展至地表

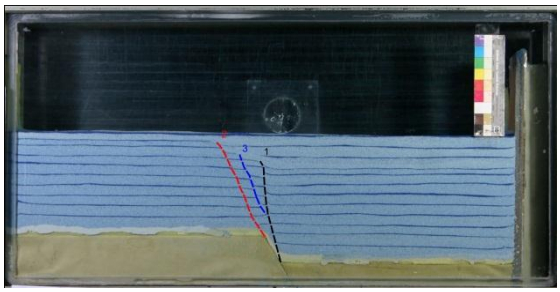
圖 2-3-7 一層生長層之正斷層實驗結果(重複性實驗)



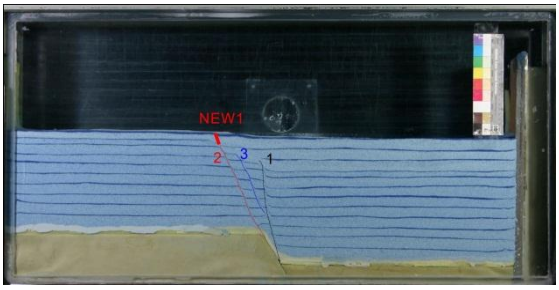
(a) ΔH/H=6%第一條剪切帶發展至地表



(b) ΔH/H=20%



(c)鋪上生長層



(d) ΔH/H=1%第一條剪切帶發展至地表

圖 2-3-8 一層生長層之正斷層實驗結果(重複性實驗)

2.3.2. 離心機斷層錯動模型實驗

利用相似模擬來研究物理現象，藉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(prototype)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(圖 2-3-9)。而利用旋轉製造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。進行物理模型試驗 (1g 模型或離心模型) 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(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(圖 2-3-10)。本小節討論離心斷層模型試驗的模型設計及規劃，經由在不同 g 的試驗條件下，物理模型所得到斷層錯動模擬的成果，來印證數值模擬(PFC^{2D})成果的合理性。

i. 離心模型試驗的因次分析

圖 2-3-11 為二維土壩原型與二維離心土壩物理模型從力平衡方程式的比較。式 2-3-1 為土壩原型內任一 A 點的力平衡方程式，

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}=0$$
$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial \sigma_y}{\partial y}-\rho g=0 \qquad (2\text{-}3\text{-}1)$$

而式 2-3-2 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。

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial (x/N)}+\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial (y/N)}=0$$
$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial (x/N)}+\frac{\partial \sigma_y}{\partial (y/N)}-\rho N g=0 \qquad (2\text{-}3\text{-}2)$$

經過簡化後，式 2-3-1 跟式 2-3-2 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^*

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

模型長度縮尺比，L^*

$$L^* = \frac{L_m}{L_p} = \frac{1}{N} \qquad (2\text{-}3\text{-}4)$$

本節中所有符號的下標 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

$$\sigma^* = \frac{\sigma_m}{\sigma_p} = \frac{\rho_m g_m h_m}{\rho_p g_p h_p} = \rho^* g^* h^* = 1 \qquad (2\text{-}3\text{-}5)$$

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

$$\rho^* = \frac{\rho_m}{\rho_p} = 1 \qquad (2\text{-}3\text{-}6)$$

因為 1/N 縮尺的離心模型 $h^* = L^*$，所以 式 2-3-5 可寫成：

$$g^* = \frac{\sigma^*}{\rho^* L^*} = \frac{1}{L^*} = N \qquad (2\text{-}3\text{-}7)$$

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。表 2-3-2 為離心模型與原型之相似性比較表。由以上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縮尺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，本計畫分別利用砂質及黏土地盤進行 1/80 縮尺的正斷層及逆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。

ii. 離心模型試驗模型試驗箱設計及試驗規劃

適宜的模型試驗箱(container)是離心模型試驗成功與否最重要的條件。本研究斷層錯動模擬試驗箱(fault simulation container)的設計及製作，不但考量影響斷層跡發展的因素外，也配合了中央大學離心機的容量(capacity)以及使用空間上的限制條件。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 度斷層傾角及不同垂直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。進行斷層錯動離心模擬的試驗變數，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。另外能夠在不同 g 值飛行情況下，利用地表變位掃瞄台車量測地表斷層剖面的的發展及演化情形。

本研究設計的斷層錯動模擬試驗箱尺寸，受限於離心機掛台空間(長×寬×高)及掛台容許載重(400kg)的限制，因此斷層錯動模擬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。斷層錯動模擬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的空間，包括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，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，上下垂直錯動位移可達到 6 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 公尺的土體，斷層錯動沿設定 60 度的滑動面，原型最大垂直錯動距離可達 4.8 公尺。本研究另外設計利用煞車馬達推拉掃瞄地表剖面的掃瞄台車(surface profile scanner)。掃瞄台車裝設一支可以量測水平距離(X)的雷射位移計，以及一支可以量測地表剖面高程(Z)的雷射位移計。在高 g 飛行的情況下，試驗過程中，不需停機，可以進行地表高程的掃瞄，來掌握在不同正斷層或逆斷層錯動量時地表剖面的變化。圖 2-3-12(a)為斷層錯動模擬試驗箱，圖 2-3-12(b)則為所裝置地表剖面掃瞄台車的照片。圖 2-3-13(a)及圖 2-3-13(b)為利用地表剖面掃瞄台車掃瞄斷層錯動試驗，地表剖面的試驗配置圖。圖 2-3-14(a)及圖 2-3-14(b)為掃瞄台車在逆斷層或正斷層錯動試驗時，由資料蒐集電腦顯示器所顯示量測之水平距離及地表高程的剖面圖。

iii. 試驗用砂的性質

本試驗分別利用乾燥砂及人工黏土，進行正斷層或逆斷層錯動離心模型試驗。試驗砂床利用石英矽砂及染色石英矽砂製作而成。本研究所採用的石英矽砂顏色是白色，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矽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。

石英矽砂最大及最小乾單位重，由日本 JSF T26-81T 之試驗方法求得，其最大乾單位重為 16.27(kN/m3)，最小乾單位重為 13.52(kN/m3)。試體製作之相對密度，由此最大最小乾單位重計算求得。本試驗用砂分別針對相對密度 40%、60%、70% 之乾砂試體進行直接剪力試驗，試驗結果相對密度 40% 乾砂之內摩擦角約為 35 度。表 2-3-3 為試驗砂樣的基本物理性質；圖 2-3-15 為試驗用砂篩分析曲線。

本研究以霣降法製作砂土模型試體床，以圖 2-3-16 所示之移動式霣降儀，配合固定落距，可以進行不同相對密度的試體床準備。以移動式霣降儀，製作乾砂模型試體床之方法及步驟如下:

(1) 降下霣降機之盛土漏斗，並將試驗用砂土(石英細砂)，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，以此為砂土實降高度。

(3) 開啟鋼管管口進行實降，實降路徑採用 U 型迴圈路徑法，使各層之土壤表面保持平整，並保持每層實降高度維持一定，確保試體內不同深度處砂土之相對密度一致。

(4) 每層實降砂層之厚度，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。利用小漏斗鋪築約 0.5 公分的藍色砂層，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，循序放入土壓計，並小心固定訊號線。重複步驟 3、4、5 直到試驗砂床，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。

完成試體製作的試體，利用吊車吊至離心掛台上，接上馬達的電源線及各式感測器的導線至資料蒐集系統，經過飛行安全檢核後，即可開動離心機，進行斷層錯動的離心模型試驗。離心飛行前，利用地表剖面掃瞄車，先進行地表剖面的掃瞄，隨後每隔 10g 進行一次掃瞄作業，直至試驗 g 數(40g 或 80g)為止，此階段的量測主要是量取從 1g 到 80g 砂層的沈陷量。到達試驗 g 值(40g 或 80g)後，開動推動斷層錯動的馬達（馬達頂升速率 2.0mm/min.），馬達向上頂升時，進行逆斷層錯動的模擬，每隔固定時間，開動斷層錯動剖面掃瞄台車，進行不同逆斷層錯動量時的地表剖面量測。掃瞄成果如圖 2-3-14(a)所示。如果馬達帶動推板向下陷落時，則進行正斷層錯動的模擬，同樣每隔固定時間，開動斷層錯動剖面掃瞄台車，進行不同正斷層錯動量的地表剖面量測。掃瞄成果如圖 2-3-14(b)所示。

iv. 人工黏土的性質

本研究採用皂土(bentonite)及乾油(glycerin)製作人工黏土。此人工黏土具有含油量不會

改變及受剪時不易排水的特點，最適合進行物理模型試驗；另外不會排水的特點可以模擬地震時，斷層快速破裂，地盤屬於不排水受剪的情況。依不同的甘油質量比，將皂土與甘油拌和成人工黏土，然後進行標準夯實試驗，圖 2-3-17 為人工黏土的夯實曲線及十字片剪力強度的關係。本試驗的人工黏土採用含油量為 40%，利用分層靜壓方式，來準備黏土試體。人工黏土試體製作之步驟如下：(1)首先標記試驗箱並分層放入拌合完成之人工黏土；(2)每層靠壓克力視窗處，小心鋪上染色後之藍色黏土作為標記；(3)將黏土層利用靜壓壓到預定的高度；(4)利用扭剪儀量測每分層的剪力強度；(5)最後整平試體床表面。圖 2-3-18 為人工黏土試體之準備過程照片。製作完成之人工黏土試體厚度約 22cm，單位重為 16.7 kN/m^3，平均十字片剪力強度在 40g 時約 37 kPa，在 80g 時約 46 kPa。

完成試體製作的黏土試體，利用吊車吊至離心掛台上，接上馬達的電源線及各式感測器的導線至資料蒐集系統，即可開動離心機，進行斷層錯動的離心模型試驗。離心飛行前，利用地表剖面掃瞄車，先進行地表剖面的掃瞄，隨後每隔 10g 進行一次掃瞄作業，直至試驗 g 數(40g 或 80g)為止，此階段的量測主要是量取從 1g 到 80g 黏土層的沈陷量。表 2-3-4 為四組粘土試體的基本性質。當試體飛行到達試驗 g 值(40g 或 80g)後，開動推動斷層錯動的馬達（馬達頂升速率 2.0 mm/min.），馬達向上頂升時，進行正斷層或逆斷層錯動的模擬，每隔固定時間，開動斷層錯動剖面掃瞄台車，進行不同斷層錯動量時的地表剖面量測。

v. 目前完成的斷層錯動試驗種類及試驗條件

表 2-3-4 為本連續計畫直至目前已完成的斷層錯動試驗種類及試驗條件。試驗變數包括試驗的 g 值、覆土層厚度、砂土相對密度(Dr) 、不同覆土層種類(砂土及黏土)以及斷層抬升高度等。共進行 36 組不同試驗條件的正斷層及逆斷層錯動試驗。表中括弧內數字代表覆土層的原型尺寸及斷層錯動量的原型尺寸，單位為公尺。其中有三組人工黏土的正斷層錯動試驗(40gNtest32-C 、 50gNtest36-C 及 80gNtest37-C)及一組逆斷層試驗(80gRtest38-C)。試驗目的主要為瞭解黏土地盤在不同垂直錯動量下，地表及地下變位剖面及範圍的掌握，另外試驗成果也將作為 PFC^{2D} 數值模擬(numerical modeling)與物理模擬(physical modeling)之比對與校正之用。因此試驗升 g 過程，每 10 g 都記錄地表高程的變化，藉以瞭解覆土層的沈陷量，並與 PFC^{2D} 的結果比對。而到達 40g 、50g 或 80g 時，斷層每

垂直錯動 2.5 mm，隨即利用掃瞄台車掃瞄地表剖面，瞭解不同垂直錯動量對地表及地下變位剖面及範圍的影響。

vi. 逆斷層試驗成果及不同 g 值試驗結果的比較比較

利用掃瞄台車進行斷層剖面掃瞄，可以有效掌握在不同斷層錯動量下，地表剖面的變化。本試驗每隔 2.5 mm 的斷層垂直錯動量，掃瞄地表剖面一次。圖 2-3-19 及圖 2-3-20 為在 80g 的試驗條件下，逆斷層錯動試驗(80gRtest23)，在不同垂直錯動量下的地表變形曲線。圖中水平距離 0，代表斷層尖端所處位置。圖中顯示隨著垂直錯動量的增加，斷層錯動所形成的邊坡角度逐漸增加，且逐漸向前崩落及堆積；垂直錯動量可以利用垂直錯動頂升高度來表示，也可以利用頂升高度與覆土層厚度的百分比來表示。本實驗最大錯動量為上覆土層厚度的 25%。而圖 2-3-20 則可以顯示斷層錯動角度及位置與地表變形剖面之對應關係。圖 2-3-21 為在不同垂直錯動量下的正規化地表變形曲線。圖 2-3-21 中的正規化水平距離等於以斷層尖端為零點的距離除以覆土層厚度，而垂直座標則為地表上升高度除以斷層垂直錯動距離，該正規化地表變形曲線，在垂直錯動量超過上覆土層厚度的 8.75%後 ，則正規化地表變形曲線漸趨近於一致。圖中亦顯示傾角 60o 的逆斷層錯動，地表所影響範圍約為覆土層的厚度。

圖 2-3-22 及圖 2-3-23 為在 40g 的試驗條件下，逆斷層錯動試驗(40gRtest21)在不同垂直錯動量下的地表變形曲線。圖 2-3-24 則為在不同垂直錯動量下的正規化地表變形曲線。圖 2-3-25 及圖 2-3-26 為在 1g 的試驗條件下，逆斷層錯動試驗(1gRtest20)在不同垂直錯動量下的地表變形曲線。圖 2-3-27 則為在不同垂直錯動量下的正規化地表變形曲線。試驗的成果顯示在不同的 g 值試驗條件下，逆斷層錯動造成地表變位的趨勢大致一致，但是在 1g 的試驗條件下，地表變位剖面變化比較不平滑。圖 2-3-28 為逆斷層錯動試驗，在不同試驗 g 值下，兩個不同垂直錯動量（12.5%、25%）的地表變位剖面。圖中顯示高 g 的試驗有較平緩的坡度，特別在 1g 的試驗斷層坡度較陡，坡面也較不規

則，這現象可能是砂土微小的吸力(suction)所造成。

圖 2-3-29、圖 2-3-30 及圖 2-3-31 逆斷層錯動試驗在不同 g 值試驗條件下，垂直錯動距離(50mm; 25%)的斷層側視剖面。雖然由前面的試驗成果發現，地表變形剖面並不隨著試驗 g 值的不同，而有太大的不同，但圖中顯示在低 g 值的試驗條件，地下土層發生較寬大的剪裂帶；在高 g 的試驗條件，地下土層剪裂帶發展的範圍較小，最主要的原因可能是在高 g 情況下，砂土的膨脹角受到高覆土應力的抑制，相較於 1g 條件下的試體，高 g 試驗條件下地下土層剪裂帶，比較不容易發展。

表 2-3-2 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

表 2-3-3 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/cm^3)	1.66
最小乾密度 ρ_{dmin}(g/cm^3)	1.38
統一土壤分類	SP

表 2-3-4 四組粘土試體的基本性質

試驗編號	g 數	沉陷量 (mm)	單位重 (t/m^3)	垂直平均十字片剪力強度(kPa)	水平平均十字片剪力強度(kPa)	無圍壓縮強度 (kPa)
40gNtest32	40	3.9	1.646	37.12	x	x
50gNtest36	50	6.77	1.668	38.27	x	22
80gNtest37	80	9.05	1.675	46.24	35.76	x
80gRtest38	80	10.86	1.665	46.12	39.71	x

表 2-3-5 目前已完成的試驗編號及試驗條件

試驗編號	覆土層相對密度(Dr) %	覆土層厚度*(cm)	抬升高度#(cm)
1gRtest1	40	20	5.0
1gRtest2	40	10	5.0
1gRtest3	70	10	5.0
1gRtest4	70	20	5.0
10gRtest5	70	20 **(2m)**	3.8 **(0.38 m)**
10gRtest6	70	20 **(2m)**	5.0 **(0.50 m)**
10gRtest7	70	20 **(2m)**	1.30 **(0.13 m)**
10gRtest8	70	20 **(2m)**	3.5 **(0.35 m)**
40gRtest9	70	20 **(8m)**	5.0 **(2.0 m)**
80gRtest10	70	20 **(16m)**	5.0 **(4.0 m)**
40gRtest11	70	20 **(8m)**	5.0 **(2.0 m)**
80gRtest12	70	20 **(16m)**	5.0 **(4.0 m)**
80gRtest13	70	20 **(16m)**	3 **(2.4 m)**
1gRtest14	70	20	5.0
80gRtest15	70	20 **(16 m)**	5.0 **(4.0 m)**
1gRest16	70	20	3.5
40gRtest17	70	20 **(8 m)**	5.0 **(2.0 m)**
1gNtest18	85	20	5.0
1gRtest20	70	20	5.0
40gRtest21	70	20 **(8 m)**	5.0 **(2.0 m)**
80gRtest22	70	20 **(16 m)**	5.0 **(4.0 m)**
80gRtest23	70	20 **(16 m)**	5.0 **(4.0 m)**
80gNtest24	70	20 **(16 m)**	5.0 **(4.0 m)**
80gNtest25	70	20 **(16 m)**	5.0 **(4.0 m)**
40gNtest26	70	20 **(8 m)**	5.0 **(2.0 m)**
80gNtest27	50	20 **(16 m)**	5.0 **(4.0 m)**
80gNtest28	70	20 **(16 m)**	5.0 **(4.0 m)**
80gNtest29	70	20 **(16 m)**	5.0 **(4.0 m)**
40gNtest30	70	20 **(8 m)**	5.0 **(2.0 m)**
1gNtest31	70	20	5
40gNtest32-C	Clay	22 **(8.8 m)**	5.0 **(2.0 m)**
1gNtest33	70	20	5.0
1gNtest34	70	20	5.0
80gNtest35-F	70	20 **(16 m)**	1.75 **(1.4 m)**
50gNtest36-C	Clay	22 **(17.6 m)**	5.0 **(2.5 m)**
80gNtest37	Clay	22 **(17.6 m)**	5.0 **(4.0 m)**
80gRtest38	Clay	22 **(17.6 m)**	5.0 **(4.0 m)**

*括弧內數字代表覆土層的原型尺寸，單位為公尺;

*括弧內數字代表斷層錯動量的原型尺寸，單位為公尺。

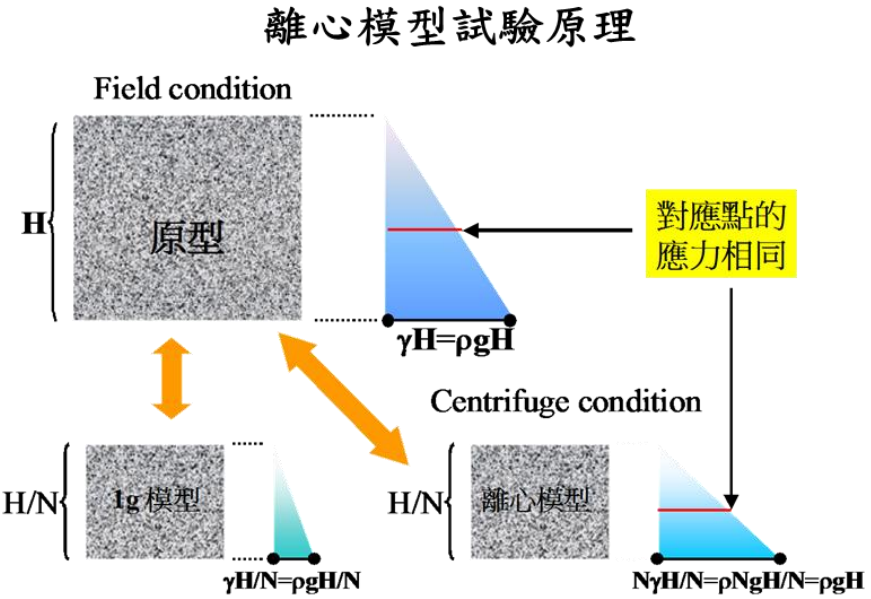


圖 2-3-9 原型、1g 模型與離心模型不同深度處對應點覆土應力之比較

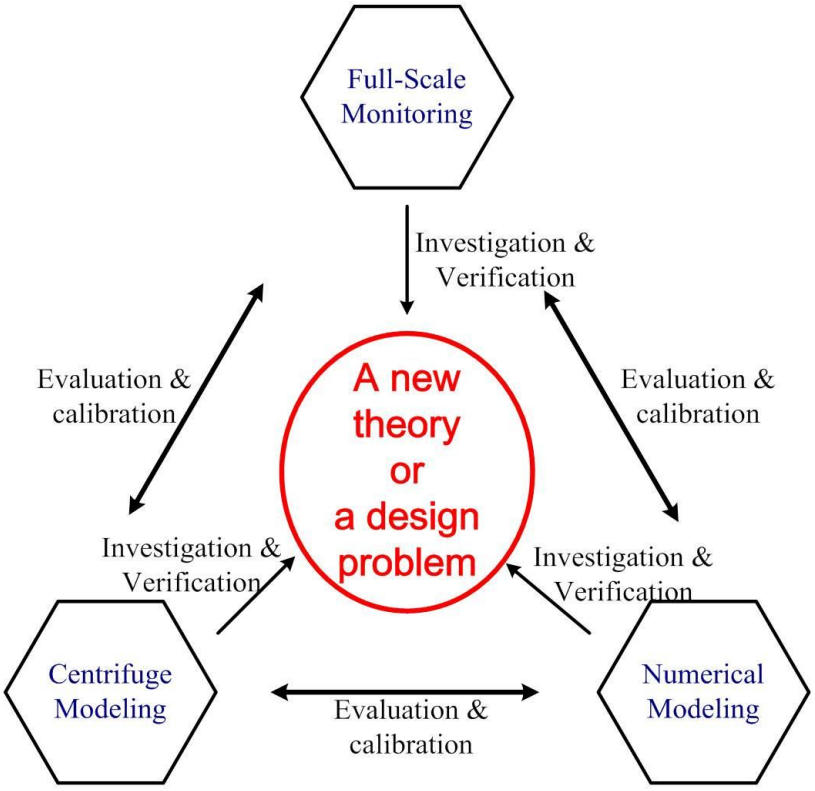


圖 2-3-10 離心模型、數值或分析模型及現場全尺度試驗相互關係

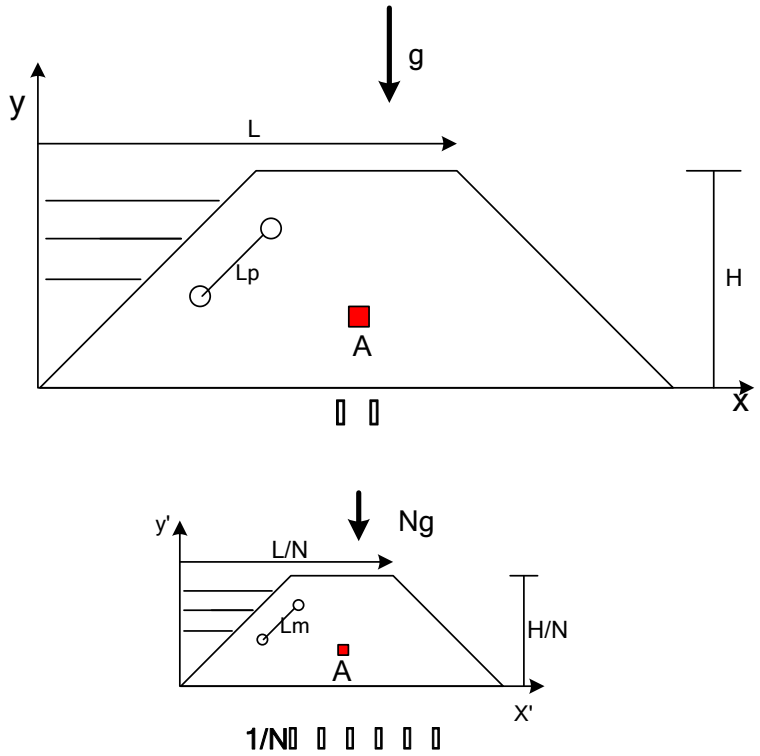
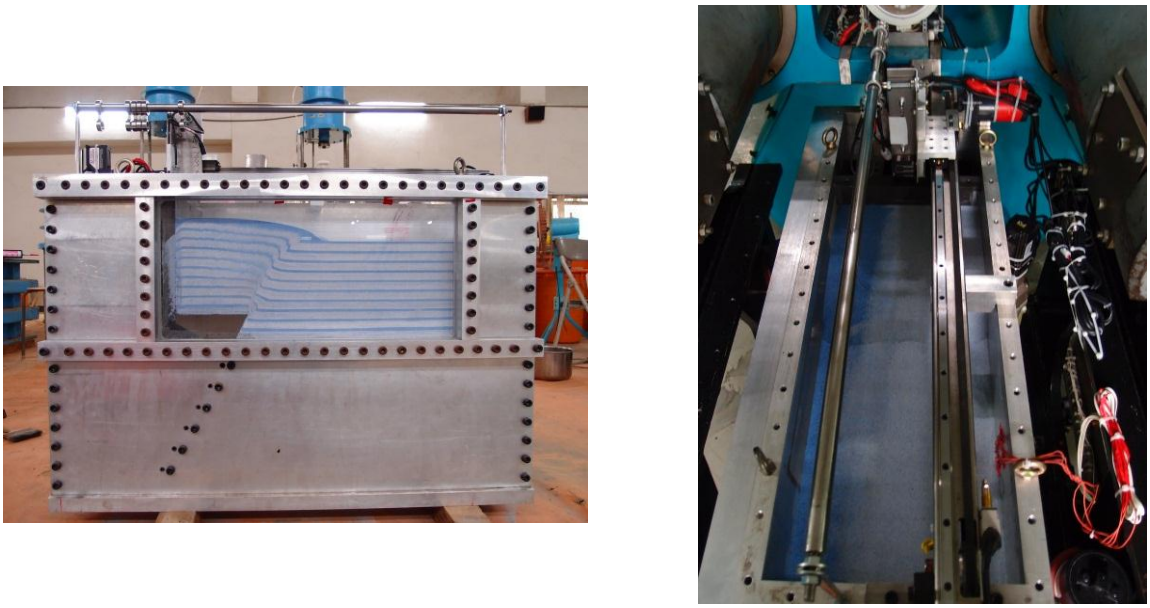
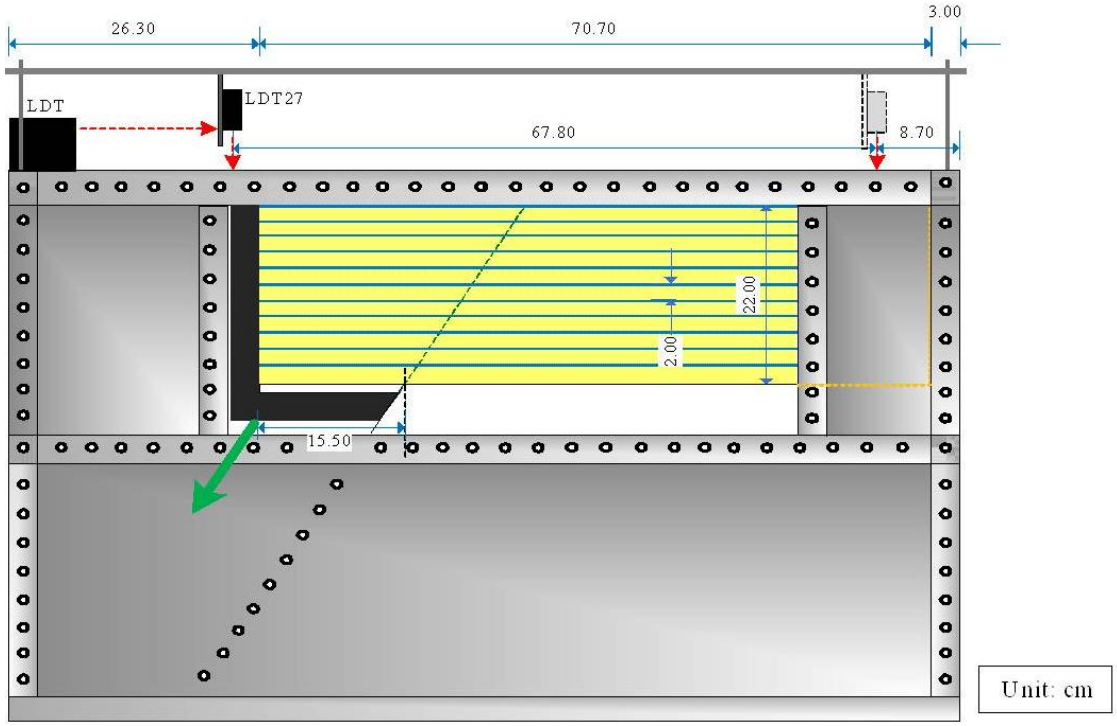


圖 2-3-11 土壩原型與 1/N 縮尺離心土壩模型

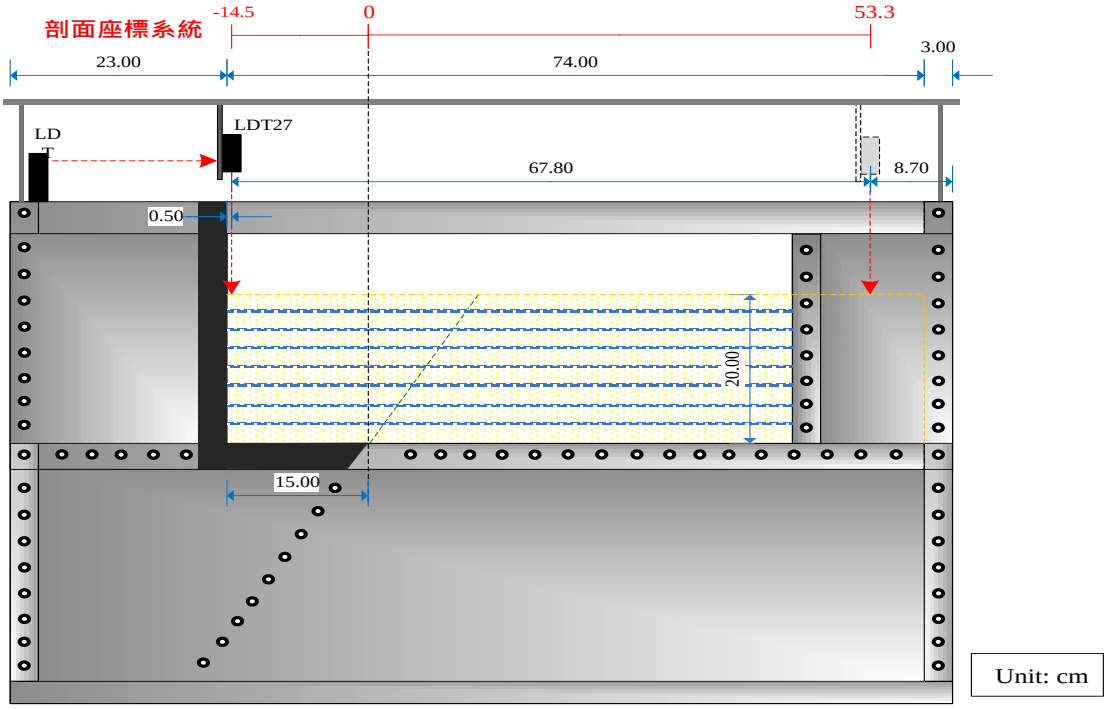


(a) (b)

圖 2-3-12 (a)斷層錯動模擬試驗箱(b)地表剖面掃瞄台車

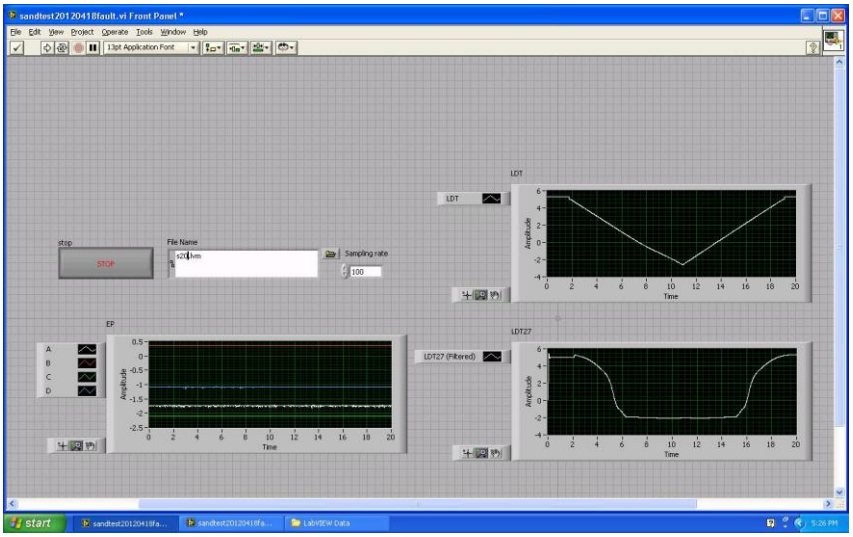


(a)

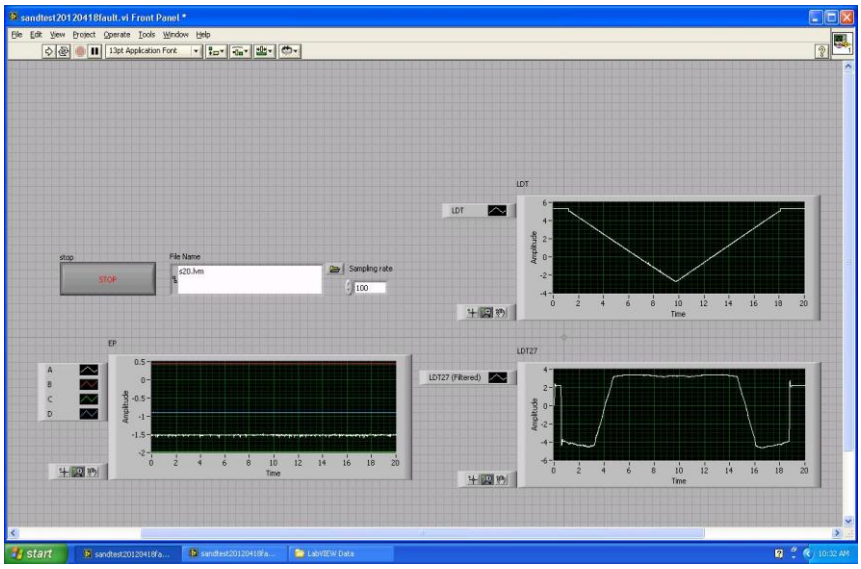


(b)

圖 2-3-13 (a)正斷層錯動試驗之座標及試驗配置圖(b)逆斷層錯動試驗之座標及試驗配置圖



(a)



(b)

圖 2-3-14(a) 掃瞄台車在逆斷層錯動試驗過程中所量測之地表剖面(b)掃瞄台車在正斷層錯動試驗過程中所量測之地表剖面

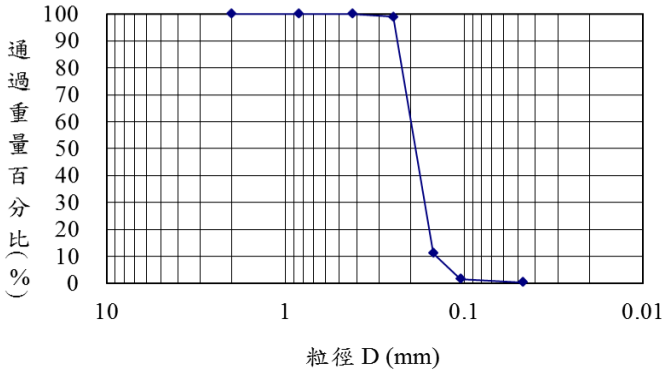


圖 2-3-15 試驗土樣之粒徑分佈圖



圖 2-3-16 裝置於試驗箱上之移動式霣降儀

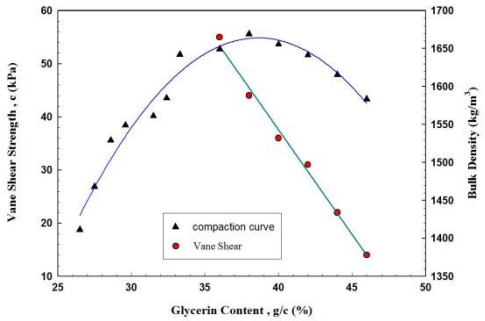


圖 2-3-17 人工黏土的夯實曲線及十字片剪力強度

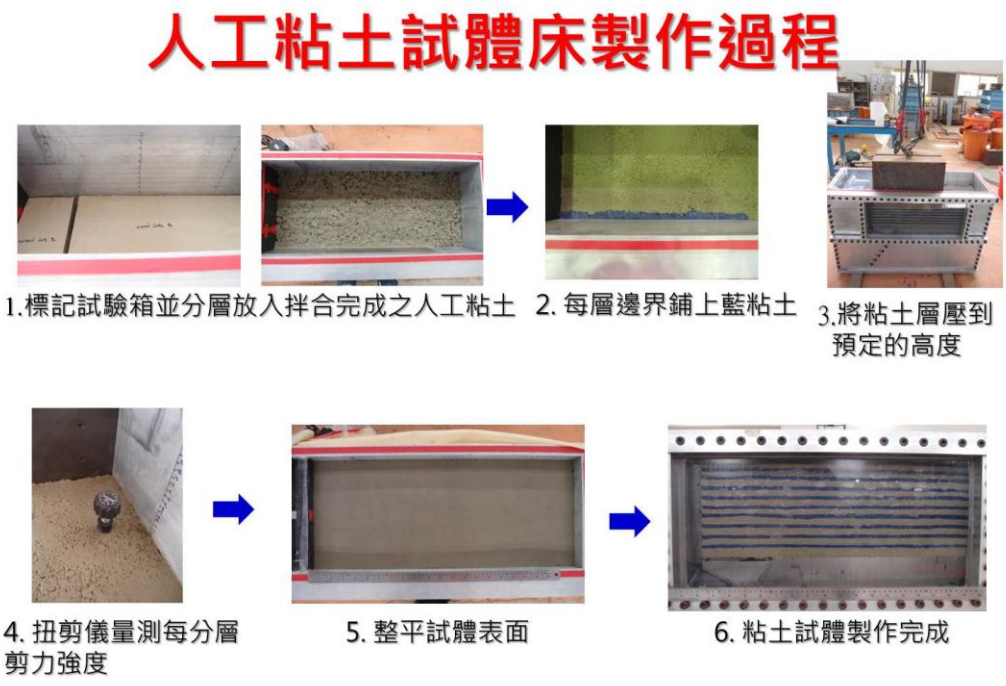


圖 2-3-18 人工黏土試體之準備過程

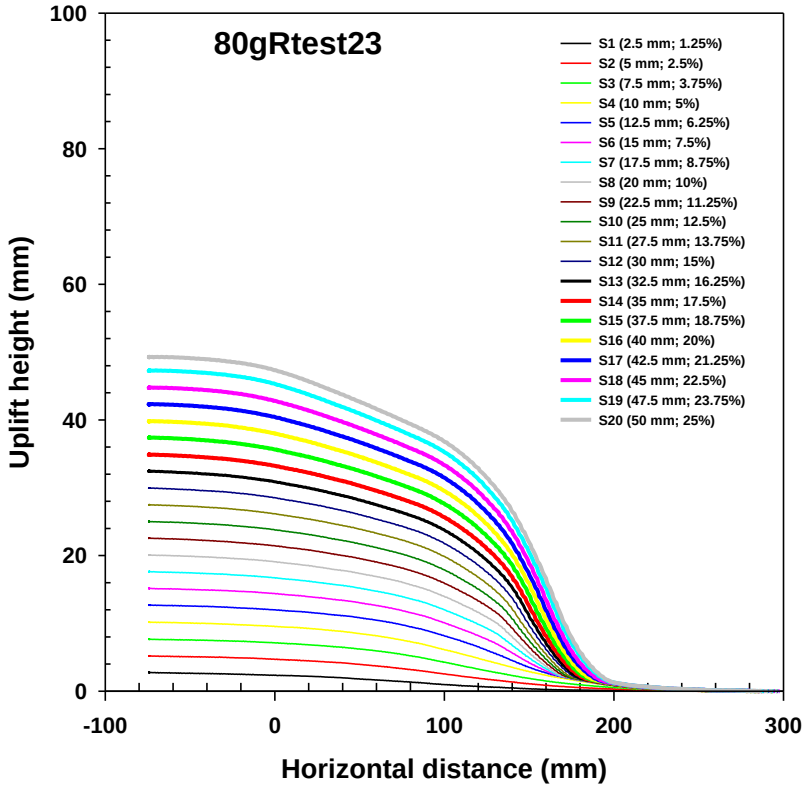


圖 2-3-19 逆斷層錯動試驗(80gRtest23)，在不同垂直錯動量下的地表變位剖面

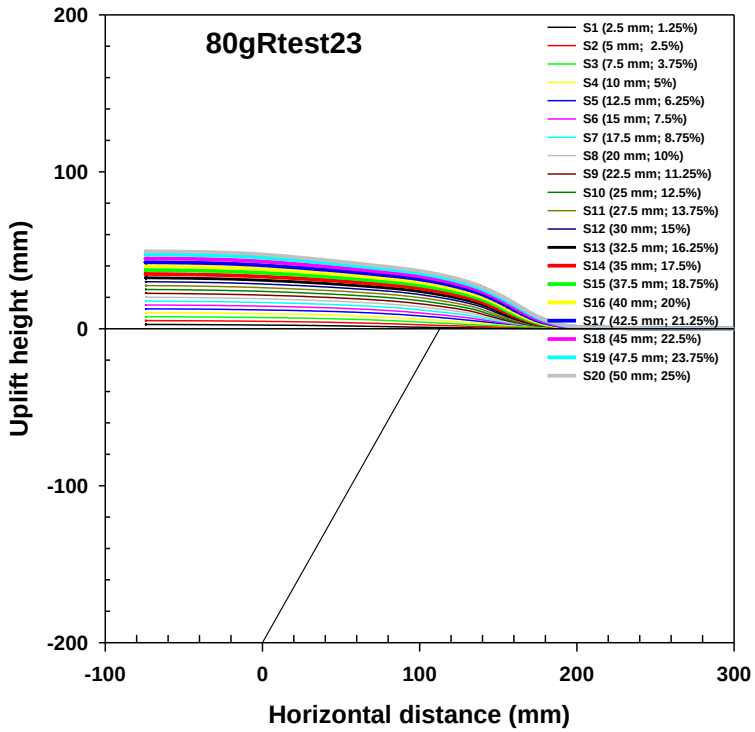


圖 2-3-20 逆斷層錯動試驗，在不同垂直錯動量的地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係(80gRtest23)

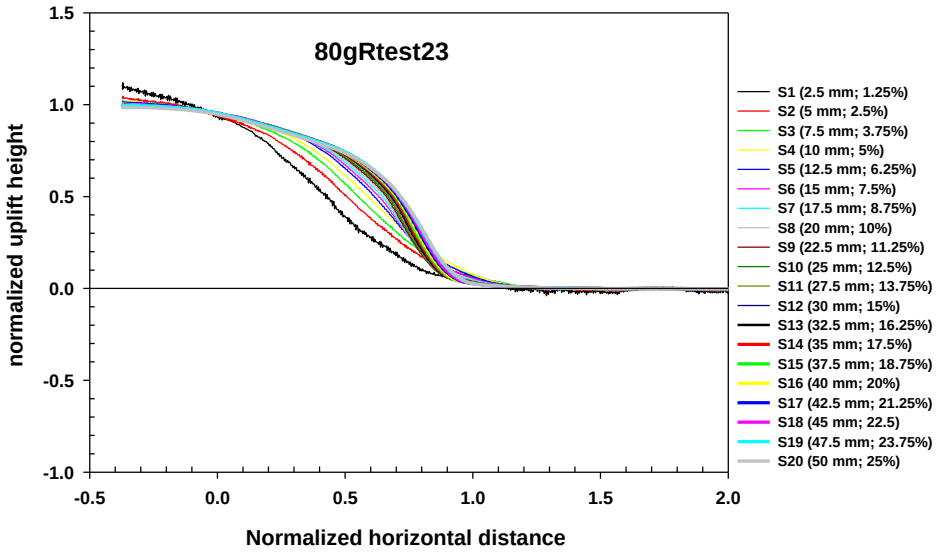


圖 2-3-21 逆斷層錯動試驗(80gRtest23)，在不同垂直錯動量的正規化地表變位剖面

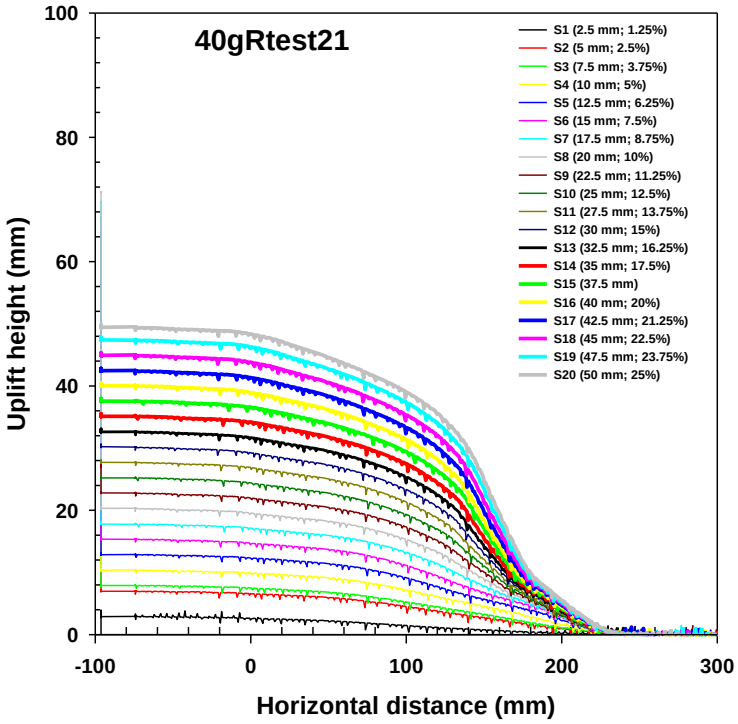


圖 2-3-22 逆斷層錯動試驗(40gRtest21)，在不同垂直錯動量的地表變位剖面

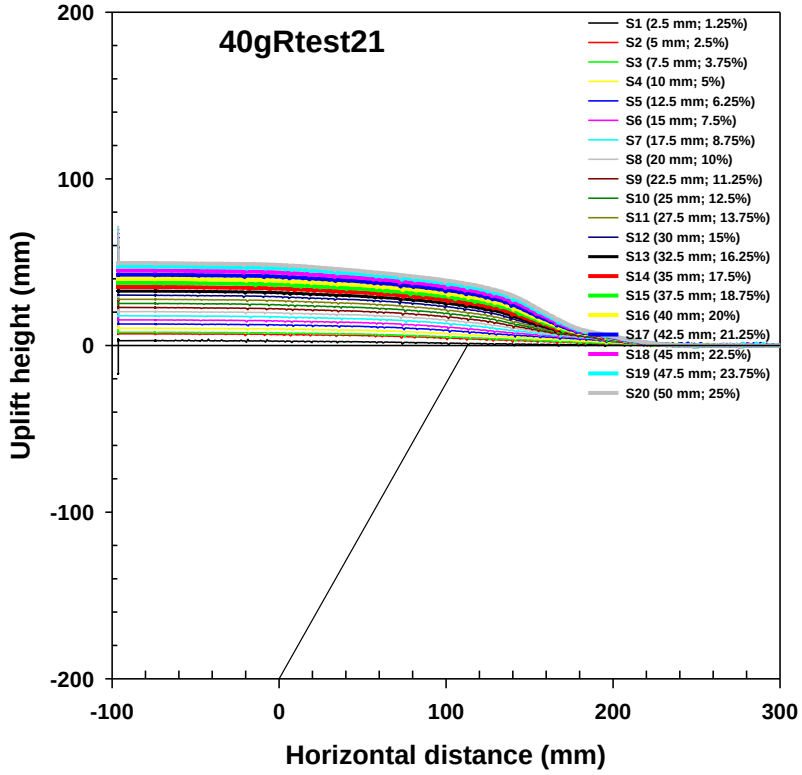


圖 2-3-23 逆斷層錯動試驗(40gRtest21)，在不同垂直錯動量的地表變位剖面

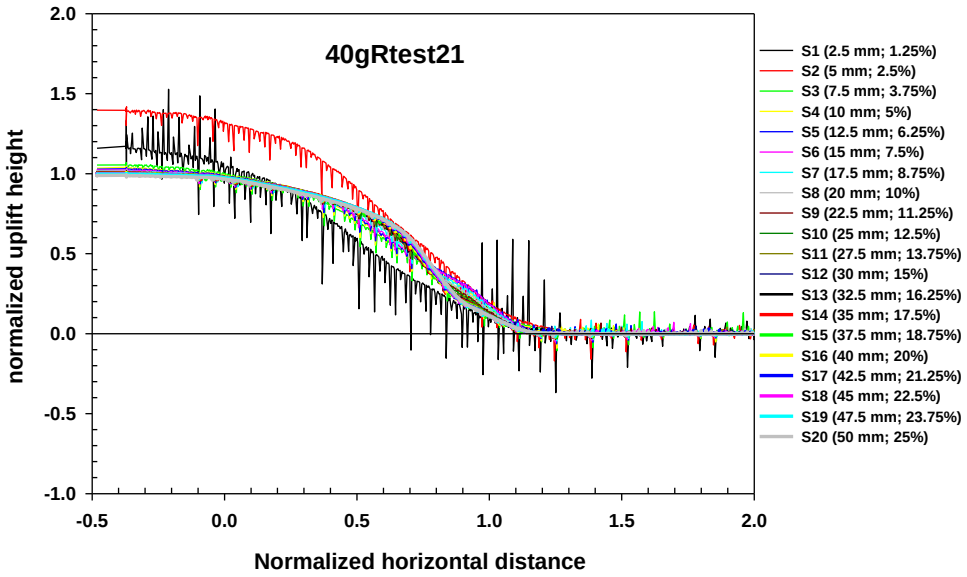


圖 2-3-24 逆斷層錯動試驗(40gRtest21)，在不同垂直錯動量的正規化地表變位剖面

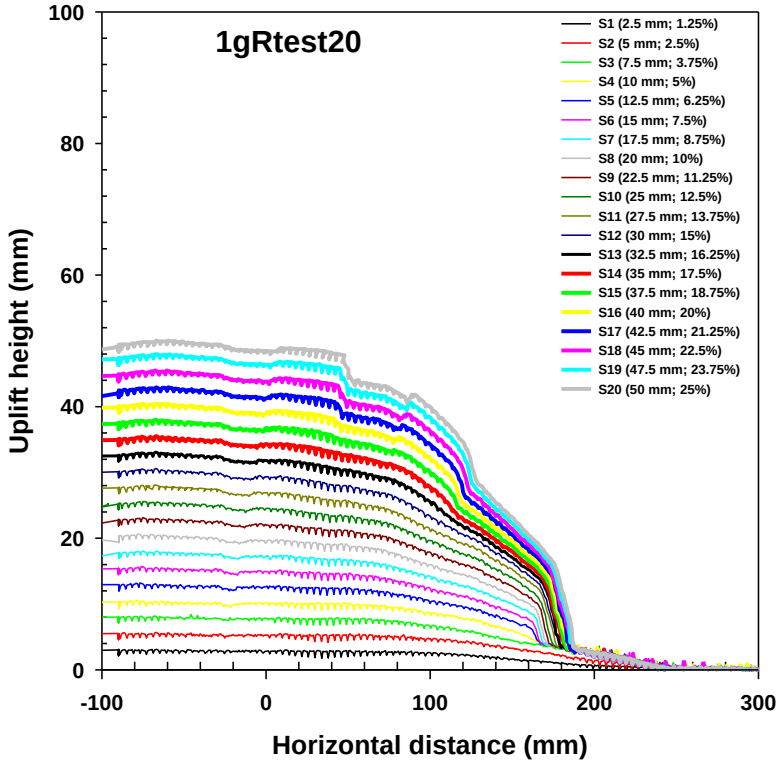


圖 2-3-25 逆斷層錯動試驗(1gRtest20)，在不同垂直錯動量的地表變位剖面

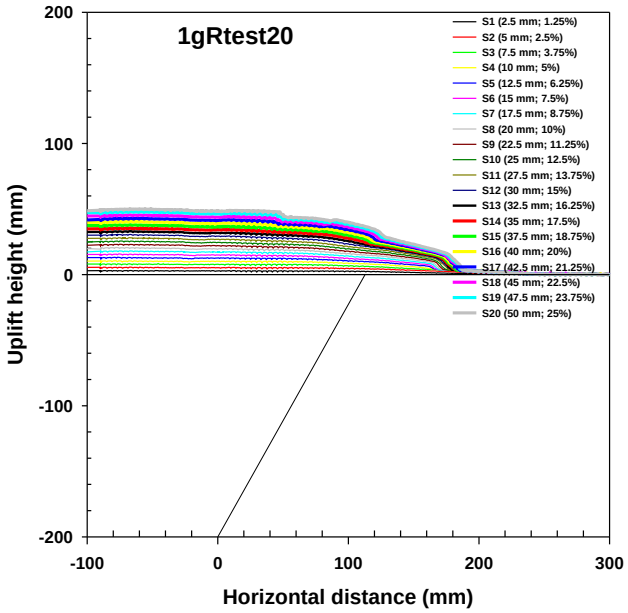


圖 2-3-26 逆斷層錯動試驗(1gRtest20)，在不同垂直錯動量的地表變位剖面

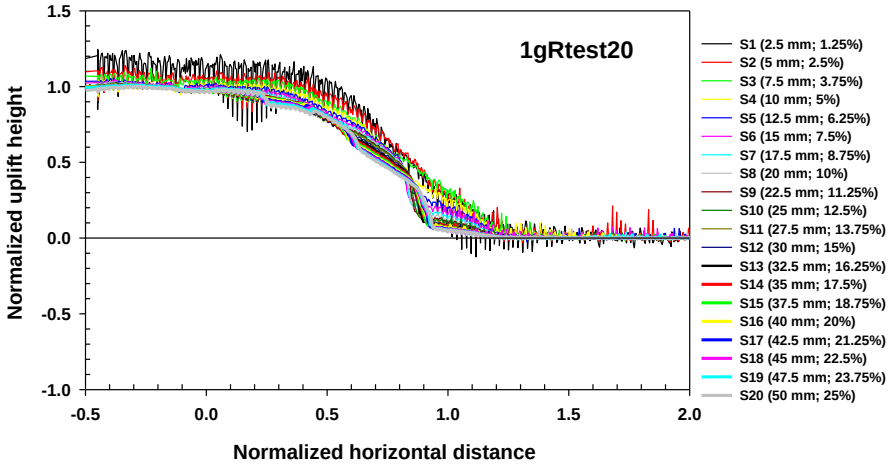


圖 2-3-27 逆斷層錯動試驗(1gRtest20)，在不同垂直錯動量的正規化地表變位剖面

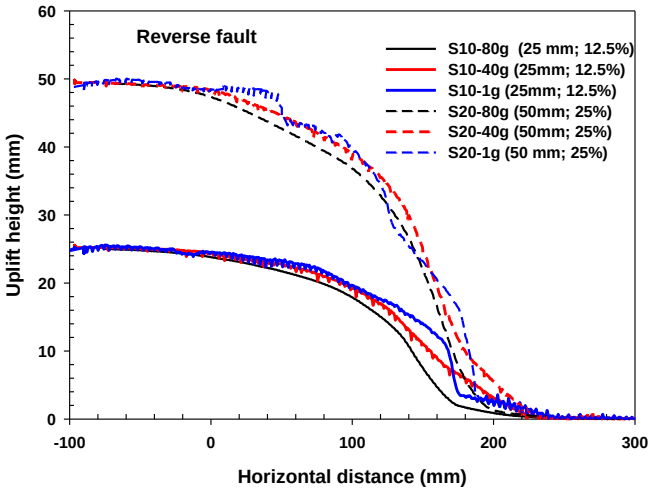


圖 2-3-28 逆斷層錯動試驗，在不同試驗 g 值下，不同垂直錯動量的地表變位剖面比較

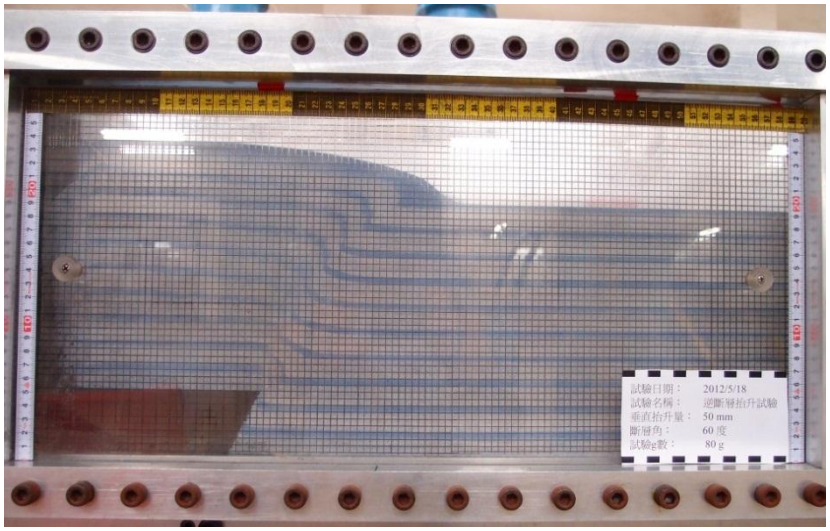


圖 2-3-29 逆斷層錯動試驗在 80g 試驗條件下，垂直錯動距離(50mm; 25%)的斷層側剖面(80gRtest23)

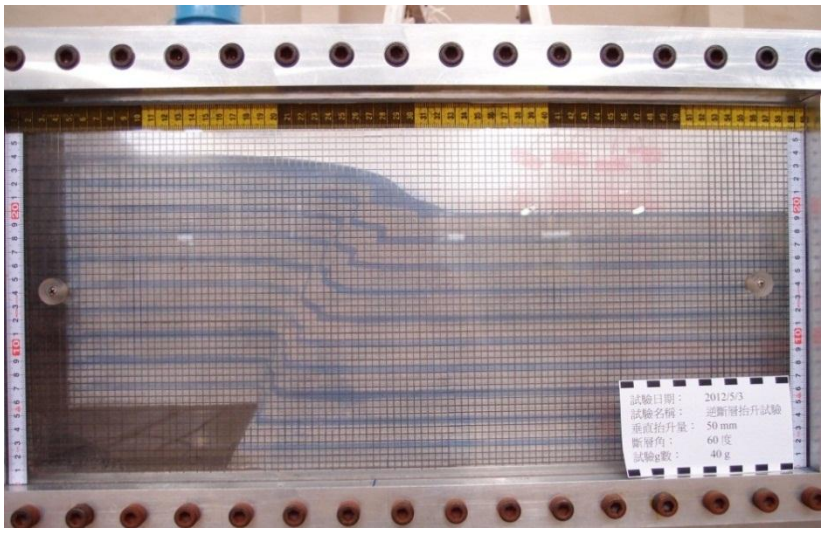


圖 2-3-30 逆斷層錯動試驗在 40g 試驗條件下，垂直錯動距離(50mm; 25%)的斷層側剖面(40gRtest21)

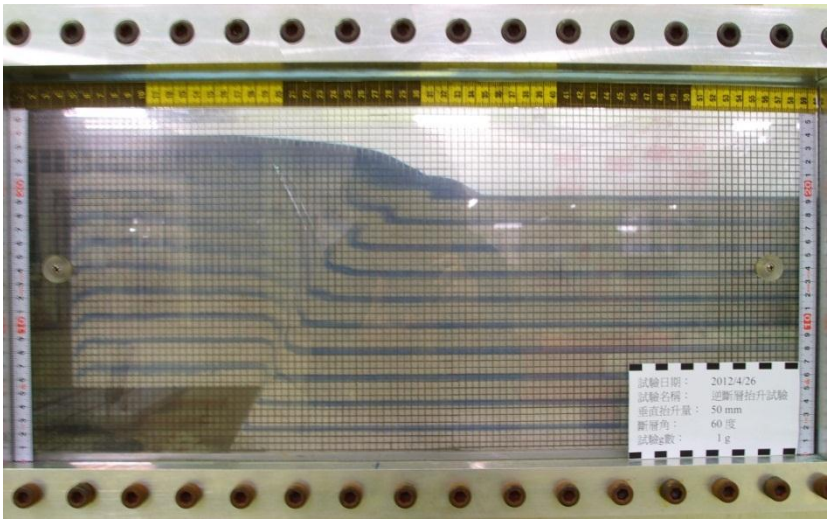


圖 2-3-31 逆斷層錯動試驗在 1g 試驗條件下，垂直錯動距離(50mm;25%)的斷層側剖面(1gRtest20)

2.4. 數值分析

本研究除了以物理模型試驗之外，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，包括假設土層為均質應變，進行連續體分析法之分析，以及假設土層或岩層為顆粒組成，進行非連續體分析法(Discrete Element Method, DEM)之分析。其介紹如下。

2.4.1. 連續體分析法

利用二維有限差分法程式 FLAC（Fast Lagrangian Analysis of. Continua），以模擬當盲斷層之基盤陷落時，對正斷層之上覆土層變形的過程，並在不同基盤陷落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。於數值模擬分析過程中，主要探討當斷層發生活動，上覆土層變形的過程，在此不考慮斷層滑動前上覆土層受外力所累積之彈性變形。

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。

二維數值分析模型建立流程各步驟分述如下：

1. 設定界面元素以模擬土層與基盤間之接觸面
2. 重力平衡
3. 設定水平向應力
4. 將界面元素釋放，以模擬當斷層滑移時，基盤與土層間之摩擦行為
5. 給定固定邊界之剛性位移模擬基盤之抬升
6. 斷層參數、沈積土層參數之敏感度分析

i. 數值分析模型

數值模型中模擬土層之網格為 100*20 網格數，建立一厚度(H)為 10 公尺、寬為 100 公尺的二維數值分析模型，其中模擬上覆土層之網格均為 1.0 m 寬*0.5 m 厚，數值模型如圖 2-4-1 所示，處於平面應變(plane strain)狀態。為模擬基盤(綠色)與上覆土層(藍色)間之接觸摩擦行為，引入界面元素(兩者間交界處)於基盤與上覆土層間，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。

ii. 數值分析參數

基本案例選用之參數、以及斷層面之傾角參數(如表 2-4-1、表 2-4-2 所示)，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)：1740 kN/m^3

(2) 變形模數：土壤揚氏模數 E 為 14.4 MPa，包生比(Poisson ratio)ν 為 0.4，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 2-4-1、式 2-4-2 可計算得到，即可得統體模數 K＝24 GPa、剪力模數 G＝5.14 GPa。

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

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

(3) 降伏準則：設定土壤摩擦角 ψ(frictional angle)＝0°、膨脹角 ψ (dilation angle)＝0°、凝聚力 c (cohesion)＝65 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。

2. 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 45°、60°、75°的情形。模擬過程中，每次沿斷層面給定邊界總滑移量為 0.2 公厘。

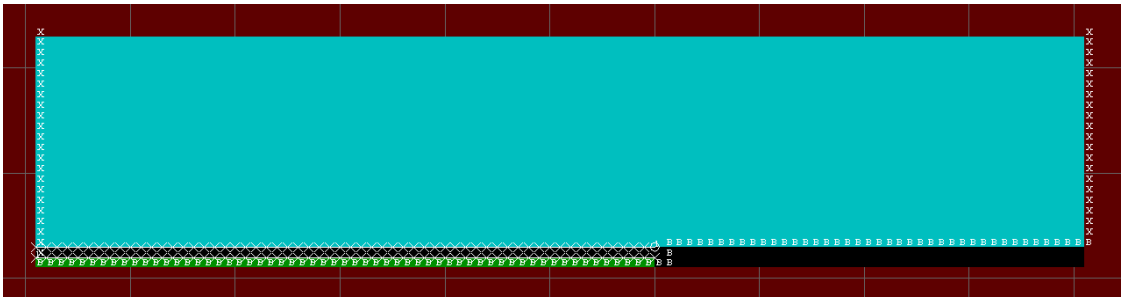


圖 2-4-1 數值分析模型

表 2-4-1 現地尺度分析之參數表(砂箱試驗參數參考鍾春富，2007)

參數	**現地尺度分析**	**單位**
	土層	
楊氏模數, *E*	14.4	MPa
柏松比, *v*	0.4	
統體模數,K	24	GPa
剪力模數,G	5.14	GPa
凝聚力, *c*	65	kPa
摩擦角,	0	degree
膨脹角,	0	degree
砂土乾單位重, γ	17.4 (飽和單位重)	kN/m^3

表 2-4-2 砂箱尺度參數探討之分析參數值

	控制參數					
分析目的	斷層傾角 **(°)**	楊氏模數 **E(MPa)**	柏松比 ***v***	凝聚力 **c(kPa)**	摩擦角 **(°)**	膨脹角 **(°)**
斷層傾角之影響	45°、60°、75°	14.4	0.4	65	0	0

2.4.2. 非連續體分析法

相較於連續體分析法，非連續體分析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，在這樣的分析法中，顆粒尺寸及數量左右模擬結果之準確性，若要於模擬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，尚不足以完整呈現如此複雜之結果，因此在研究上勢必要做一些簡化。本研究會視情況，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。

本研究之非連續體分析法，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。

i. 數值分析模型

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，斷層傾角依實驗規劃為 30~75 度，模擬之正斷層上盤下陷量最多為 0.08 公尺(ΔH/H = 0.4)。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牆作為「斷層基盤」，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 2-4-2 所示。待模型之位移達到分析所需之變位量後，即就上盤下陷量、水平影響範圍、斷層破裂帶附近應變量等進行分析及討論，並將分析結果與物理實驗做比對及討論。

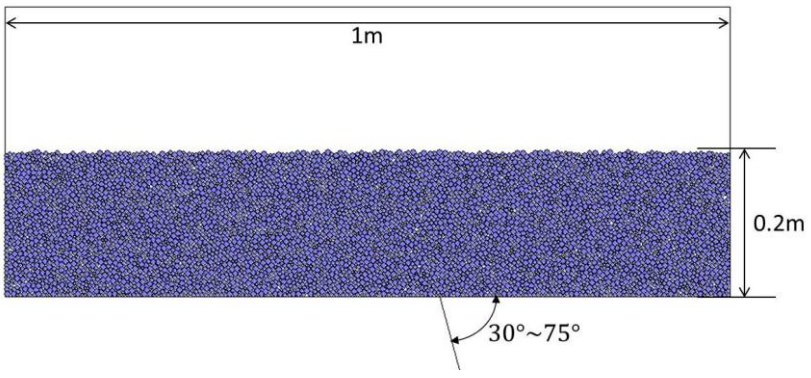


圖 2-4-2 數值模擬分析尺寸(模擬室內實驗)

ii. 數值分析參數

由於非連續體模擬中微觀參數與巨觀參數之轉換仍無良好之公式，因此本研究所使用之微觀力學參數乃參照粘為東(2010)建議之數值，如下表 2-4-3。本研究將砂土視為無凝聚力，因此沒有設鍵結力(Unbonded Model)，而摩擦角的部份是假設為 30 度，土壤(顆粒)單位重皆假設為 1.6 kN/m^3，土壤(顆粒)與岩盤界面(砂箱之外盒)摩擦係數則為 0.43。

表 2-4-3 數值分析所用參數(粘為東，2010)

參數		砂
顆粒勁度	Kn(N/m)	5.16×10^6
	Ks(N/m)	5.16×10^6
摩擦角(度)		30
土壤(顆粒)單位重 γ(kN/m^3)		1.6
土壤(顆粒)與岩盤界面摩擦係數		0.43

iii. 剪應變之計算

過去大地工程師比較熟悉用來表示剪力應變量的物理量是 γ，但 γ 只能表示一個方向的剪應變，因此在平面應變中 γ 無法同時表示朝向各種方向的剪應變。因此為了方便表示剪應變量，本研究採用了在構造地質學中所使用的計算剪應變量的方法-橢圓率，介紹如下：

Ramsay 與 Huber 在 1987 年出版的 Strain Analysis 一書中指出，以一個正方形的試體為例，假設在此正方形試體的中間本來有一個圓形區域，當此正方形受到一個單剪的作用之後，中間的圓形會變成一個橢圓形，如圖 2-4-3 所示，以下稱此橢圓形為應變橢圓(Finite strain ellipse)。透過應變橢圓，我們可以求出原來的正方形試體所受到的剪力應變場如下：

$$\begin{cases} R=\dfrac{a}{b}.....ellipticity \\ \Delta_A=\dfrac{A_{after}}{A_{before}}.....volumn\ strain \\ \dfrac{a}{r}=R(1+\Delta_A).....\max\ \ elongation \\ \tan 2\theta'=-\dfrac{2}{\gamma}.....the\ axes\ of\ \ the\ \ finite\ strain\ ellipse \end{cases}$$

r：初始圓形之半徑
a：應變橢圓長半徑
b：應變橢圓短半徑
A_{after}：原正方形試體之面積
A_{before}：剪動後平行四邊形之面積

其中，橢圓率(ellipticity)為應變橢圓的長軸與短軸的比值，這個物理量可以用來表示試體所受到的剪應變量，當試體受到的剪力越大，應變橢圓就會被拉得越狹長，橢圓率也

就會越大。而體積應變為受剪後試體的面積除以原始的面積，由此可以觀測試體膨脹或收縮的情形。另外，最大伸長量為應變橢圓之長半徑與原始圓形之半徑的比值，代表一個試體受到剪動時距離改變最大的量。最後，應變橢圓傾角θ'可以代表最大主應變的方向，而這個夾角與試體所受到的γ有關，由此我們也可以將應變橢圓反推回原始的試體受到多大的剪應變。以上幾個物理量可以完整的描述物體受到剪動時剪力應變場的情形，以單剪的試體為例，橢圓率、γ、應變橢圓傾角、體積應變及最大伸長量之間的關係如表 2-4-4 所示。本研究主要使用是橢圓率來描述試體受剪時反應出來的應變程度，為了將橢圓率用等高線的方式呈現出來，不同的橢圓率範圍會對應到不同的顏色，如圖 2-3-4 所示。

根據以上針對剪力應變的定義，Ramsay 與 Huber 亦推導出可以在平面應變的空間中將座標轉換為剪力應變場的公式，如圖 2-4-5 所示，當一個方形試體受到剪動後，任一個頂點的座標由$(x,\ y)$轉變為$(x',\ y')$時可以由一個變形矩陣來表示，如式(2-4-3)。所以只要從受剪試體的四個角中任選三個頂點，一個作為不動點，另兩個代入式(2-4-3)解出四元一次方程式後即可得到 a、b、c、d 的值。基於這條公式，本研究在模擬試體中設置監測點記錄其座標，並換算所需之變形矩陣，接著再使用 Ramsay 與 Huber 推導整理出來的公式即可求剪力應變場中的各個物理量，包括橢圓率、體積應變、最大伸長量及γ，如式(2-4-4)。

$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} \tag{2-4-3}$$

$$\begin{cases} R = \left(\dfrac{a^2+b^2+c^2+d^2+\left[(a^2+b^2+c^2+d^2)^2-4(ad-bc)^2\right]^{\frac{1}{2}}}{a^2+b^2+c^2+d^2-\left[(a^2+b^2+c^2+d^2)^2-4(ad-bc)^2\right]^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{1}{2}} \\ \Delta_A = ad-bc \\ \dfrac{a}{\gamma} = R(1+\Delta_A) \\ tan2\theta' = \dfrac{2(ad-bc)}{a^2+b^2-c^2-d^2} = -\dfrac{2}{\gamma} \end{cases} \tag{2-4-4}$$

表 2-4-4 橢圓率與剪應變、應變橢圓傾角、體積應變及最大伸長量之關係

Finite strain ellipse							
ellipticity & color	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30
γ	0	0.049	0.095	0.140	0.182	0.224	0.263
θ'	none	-44.3°	-43.6°	-43°	-42.4°	-41.8°	-41.3°
Volume change	none	1	1	1	1	1	1
Max elongation	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30

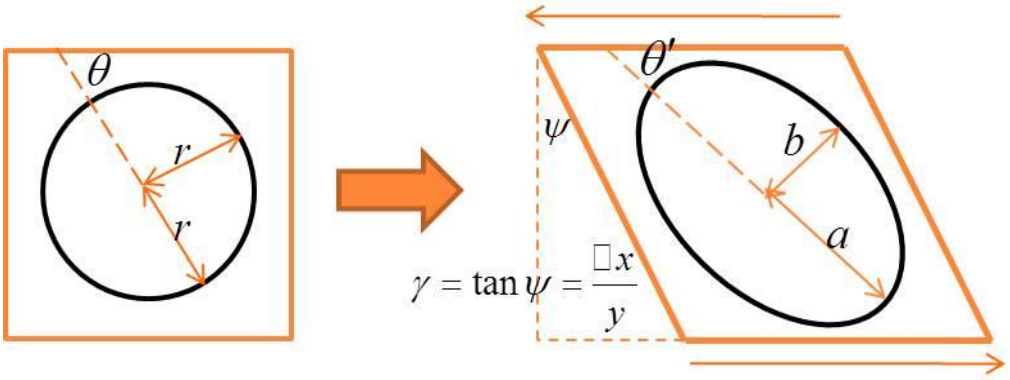


圖 2-4-3 以椭圓率描述方形試體所受到的剪力應變量

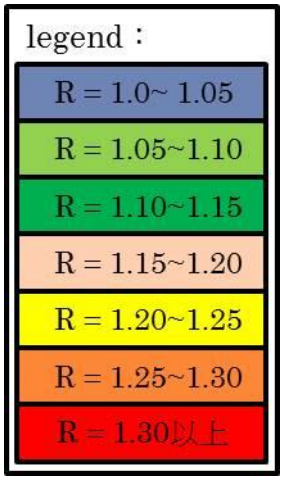


圖 2-4-4 不同橢圓率及其代表顏色之圖例

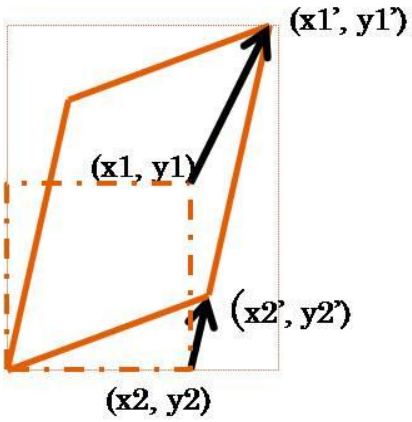
iv. 地表變形及斷層帶之描述方式

為了在非連續體分析中觀察當岩盤錯動時剪切帶之發展，本研究稱橢圓率超過 1.05 之網格為剪切帶，因此在模擬時將橢園率沒有超過 1.05 之節點網格設為藍色或白色，另將橢圓率超過 1.05 之網格設為淺綠~紅色，每個顏色之間的間格為 0.05(圖 2-4-5)，如此一來，我們可以清楚的分辨剪切帶之發展範圍(圖 2-4-6)。

計算橢圓率時必需選擇兩個階段之下的網格節點來比較，因此，不同的選擇階段的方式可以觀察到不同的重點，如圖 2-4-7 所示為三種選擇階段的方法，總應變量(Total strain)代表任一階段之結果與斷層尚未錯動的情況下做比較；增量應變量(Incremental strain)代表任一階段之結果與其上一個階段之結果做比較；而階段總應變量只出現在有生長層的情況，代表任一階段之結果與其生長層鋪設好且尚未錯動的情況下做比較。這三種不同的選擇階段的方式所畫出來的剪應變帶會有所不同，圖 2-4-8 為三種不同方法之比較。

為在非連續體分析中描述剪切帶的分佈範圍與分佈型態，並方便進行不同模擬結果之

比較，本研究在此定義了**剪切帶發展高度比(H_F/H_1)**、**剪切帶向下盤發展之寬度比(W_F/H_1)**、**剪切帶向上盤發展之寬度比(W_H/H_2)**及**反向斷層發展距離比(W_A/H_2)**四種參數，如圖 2-4-9 所示，其中剪切帶發展高度(H_F)代表剪切帶與岩盤之間的垂直距離；剪切帶向下盤發展之寬度(W_F)代表剪切帶向下盤發展最遠端與岩盤破裂尖端之水平距離；剪切帶向上盤發展之寬度(W_H)代表剪切帶向上盤發展最遠端與岩盤破裂尖端之水平距離；反向斷層發展距離(W_A)代表反向斷層之剪切帶向上盤發展最遠端與岩盤破裂尖端之水平距離，另外，隨著生長層的出現，覆土層之厚度也會隨之增加，圖 2-4-9 中之 H_1 代表下盤之總覆土厚度，H_2 代表上盤之總覆土厚度。綜合以上所述，剪切帶發展高度比(H_F/H_1)、剪切帶向下盤發展之寬度比(W_F/H_1)即代表剪切帶發展高度(H_F)、剪切帶向下盤發展之寬度(W_F)對下盤之覆土層厚度(H_1)做正規化，而剪切帶向上盤發展之寬度比(W_H/H_2)、反向斷層發展距離比(W_A/H_2)即代表剪切帶向上盤發展之寬度(W_H)、反向斷層發展距離(W_A)對上盤之覆土層厚度(H_2)做正規化。



$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix}$$

圖 2-4-5 試體受剪前後之座標的關係

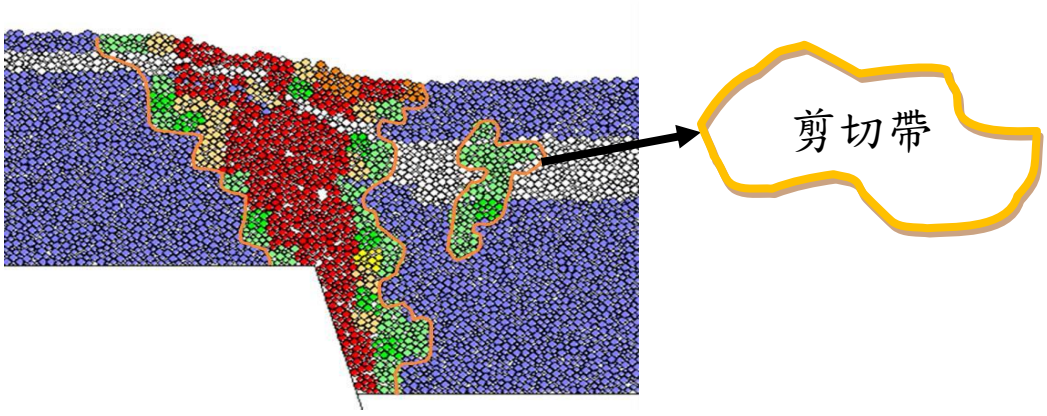


圖 2-4-6 在非連續體分析法中定義剪切帶之案例

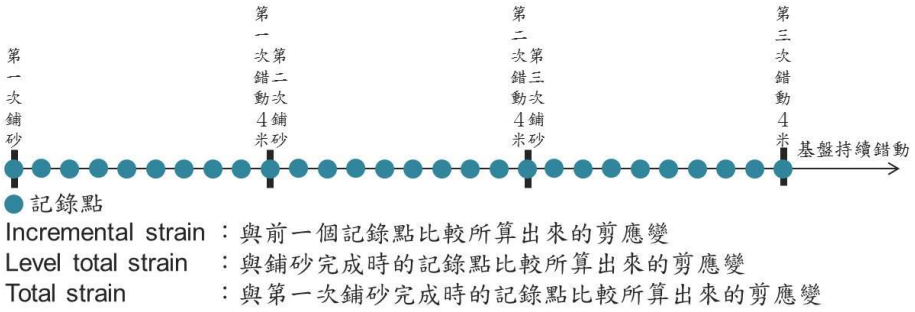
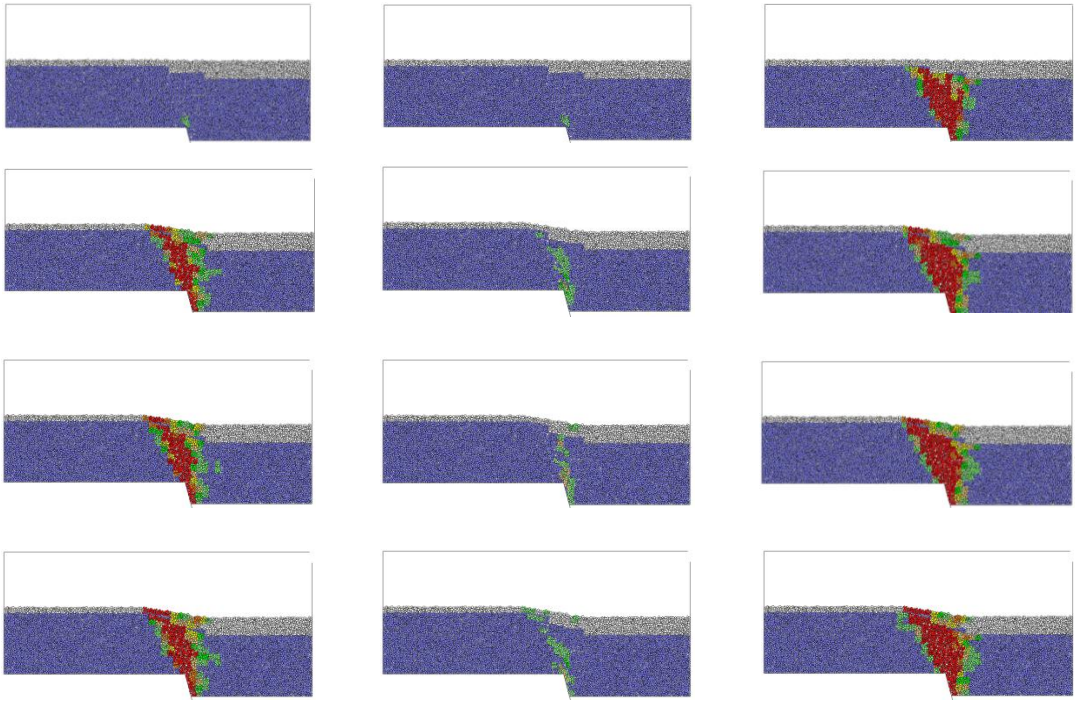
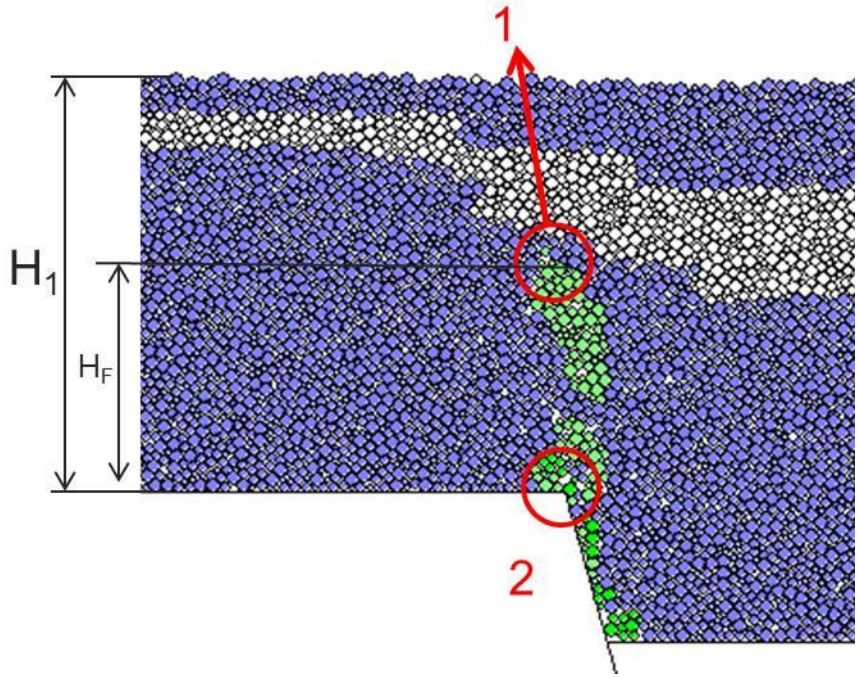


圖 2-4-7 不同選擇階段之方法

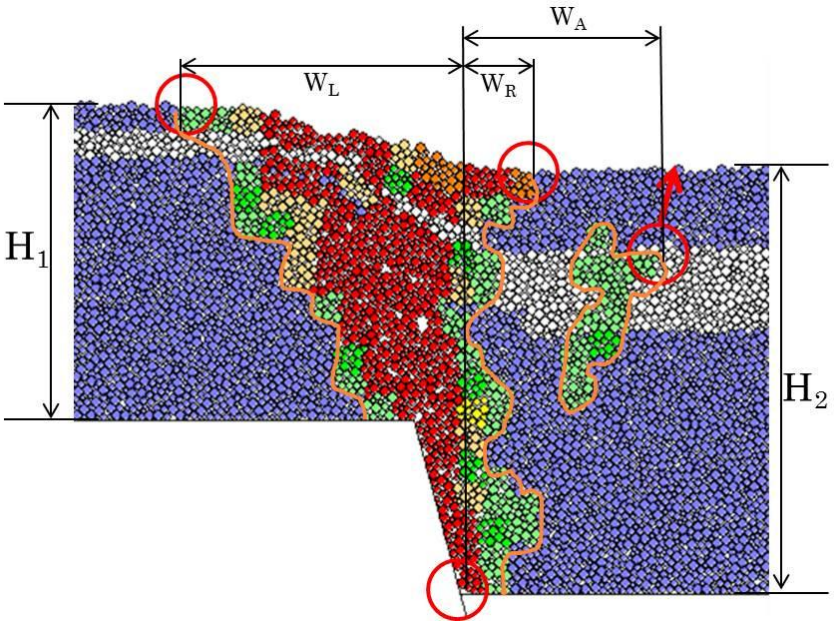


(a)階段 Total strain (b)Incremental strain (c)Total strain

圖 2-4-8 不同選擇階段的方法所得之模擬結果(以一層生長地層為例)



(a)



(b)

圖 2-4-9 剪切帶之描述示意圖

v. 模擬規劃

本研究之非連續體分析法數值模擬主要是比對物理實驗模擬及不同物理量對剪切帶發展之影響，分成沒有生長層及有生長層兩影類型。其中沒有生長斷層的模擬，為比對斷層傾角對剪切帶的影響，本研究進行了30°、45°、60°、75°四組模擬；又為了比對土層厚度對剪切帶的影響，本研究進行了覆土厚度 20cm、30cm、40cm 三組模擬；而有生長層之模擬則是在斷層錯動之ΔH/H達 20%(4cm)時，用霣降的方法鋪設新的砂土層，鋪設新砂土層所增加的厚度在下盤的部份是 2cm，上盤的部份是 6cm。如此重覆錯動再鋪設新砂土層進行了一層生長層、二層生長層及三層生長層三組模擬。本研究所使用之參數整理成一參數矩陣如表 2-4-5。

2.4.3. 以實驗方法選定微觀參數

本節討論如何從巨觀參數(E，G，ν)與 PFC2D 微觀參數(K_n，K_s，μ)間的理論關係，利用離心模型試驗的試驗結果，來率定(calibration)PFC2D 數值模擬的微觀參數，以便能以快速且有系統的方式，利用正確的微觀參數進行 PFC2D 的數值試驗，來彌補離心模型試驗，受限於試驗設備及經費無法進行大量離心模型試驗的缺點。

i. 離心模型自重壓密試驗

離心模型試驗從 1g 飛行至 80g 的過程中，可以利用雷射位移計量測不同 g 值時發生的地表沈陷。圖 2-4-10 為離心模型試驗飛行階段的累積地表沈陷與試驗砂床(10cm 深處)有效覆土應力的關係（本系列試驗砂床相對密度 Dr=70%）。隨著飛行 g 數的增加，有效覆土應力亦隨著重力場的增加而增加，累積地表沈陷量亦隨之增加。本斷層錯動模擬試驗箱設計時，在設計最大應力的條件下，側牆之最大側向變位遠小於側牆高度之千分之一，因此從土壤力學側向土壓力的觀點，在飛行階段，試體床均保持 K_o 狀態。一般正常壓密砂土，利用經驗公式$K_o = \sigma_h'/\sigma_v' = 1 - sin\emptyset'$，可以求得有效水平側向土壓力與垂直覆土應力的比值，其中 ϕ'=砂土的內摩擦角。

ii. PFC2D 自重壓密數值試驗

本節討論顆粒流分析程式，PFC2D 進行逆斷層錯動的模擬，並且與離心模型實驗數據進行比對及分析。利用離心模型試驗自重壓密階段的結果來率定 PFC2D 的微觀參數。PFC 以個別元素法(Distinct Element Method, DEM)為理論基礎，屬於非連續體分析法。PFC 基本假設、特色及運用分述如下：

(1) 顆粒為剛體，顆粒本身不可變形。顆粒間接觸面積小。

(2) 顆粒間的接觸變位關係，以正向及切向勁度彈簧代表，相鄰顆粒於接觸點上允許產生重疊。所有的重疊量尺寸皆遠小於顆粒尺寸。

(3) 相鄰顆粒重疊量，可藉由力和位移關係式計算求得。

(4) 所有的顆粒均為圓形，鍵結力存在於顆粒間之接觸點。

PFC2D 內建三種接觸點組成律(contact constitutive models)，包括：(1)勁度模式(stiffness model)；(2)滑動模式(slip model)；(3)鍵結模式(bonding model)。本研究探討砂土的變形行為，因此選用線彈性的接觸勁度模式，包括接觸點正向勁度 K_n 及接觸點剪切勁度 K_s (linear contact-stiffness model, normal stiffness and shear stiffness)來模擬顆粒接觸力與相對正向及剪切位移(normal displacement and shear displacement)的關係。滑動模式(slip model)是定義接觸點間的基本性質，決定接觸點滑動與否的關鍵，滑動模式接觸點無法承受張力，且利用接觸點間的摩擦係數 μ，來限制接觸點正向力與剪切力間的比值。

上述接觸點正向勁度 K_n、接觸點剪切勁度 K_s 以及接觸點間的摩擦係數 μ 均屬於 PFC^{2D} 的微觀參數。在目前的知識水準下，尚無法利用直接試驗來求得。因此如何利用嘗試錯誤法(trial and error)，有系統及有效率地建立 PFC2D 的微觀組成律(K_n、K_s 及 μ)與由傳統元素試驗所求得巨觀組成律(諸如楊氏係數、剪力模數及柏松比)間的關係，是 PFC^{2D} 準確模擬砂土行為重要的第一步。下節首先討論在小應變情況下，微觀模式組成率與巨觀模式組成律間的理論關係。

圖 2-4-11 為微觀模式組成率與巨觀模式組成律間的關係，假設顆粒在小應變情況下，顆粒受力階段組構沒有改變。在此受力情況下，Yimsiri & Soga 考慮不同砂土組構(fabric)

下，在堆積體橫向異向性的條件下，建立微觀組成律(K_n、K_s及 μ)與巨觀組成律楊氏係數(E_v及 E_h)、剪力模數(G_{vh} 及 G_{hh})柏松比(ν_{vh}、ν_{hv}及ν_{hh})的關係：

$$E_v = \frac{4r^2N}{3V(3-\alpha)}\left[\frac{21(5+\alpha)^2K_nK_s}{(70-10\alpha)K_n+(105+45\alpha)K_s}\right] \quad (2\text{-}4\text{-}5)$$

$$E_h = \frac{4r^2N}{3V(3-\alpha)}\left[\frac{21(5-3\alpha)^2K_nK_s}{(70-30\alpha)K_n+(105-75\alpha)K_s}\right] \quad (2\text{-}4\text{-}6)$$

$$G_{vh} = G_{hv} = \frac{4r^2N}{3V(3-\alpha)}\left[\frac{21(5+\alpha)^2(5-3\alpha)^2K_nK_s}{(50-10\alpha)[(105-46\alpha-23\alpha^2)K_n+(70-24\alpha+2\alpha^2)K_s]}\right] \quad (2\text{-}4\text{-}7)$$

$$G_{hh} = \frac{4r^2N}{3V(3-\alpha)}\left[\frac{21(5-3\alpha)^2K_nK_s}{[(210-110\alpha)K_n+(140-100\alpha)K_s]}\right] \quad (2\text{-}4\text{-}8)$$

$$\nu_{vh} = \left[\frac{(7-\alpha)(5+\alpha)(K_n-K_s)}{(5-3\alpha)[(14-2\alpha)K_n+(21+9\alpha)K_s]}\right] \quad (2\text{-}4\text{-}9)$$

$$\nu_{hv} = \left[\frac{(7-\alpha)(5-3\alpha)(K_n-K_s)}{(5+\alpha)[(14-6\alpha)K_n+(21-15\alpha)K_s]}\right] \quad (2\text{-}4\text{-}10)$$

$$\nu_{hh} = \left[\frac{(7-5\alpha)(K_n-K_s)}{[(14-6\alpha)K_n+(21-15\alpha)K_s]}\right] \quad (2\text{-}4\text{-}11)$$

其中　α ＝組構異向性程度(degree of fabric anisotropy)；

N ＝顆粒接觸點個數(coordinate numbers)；

r ＝球半徑；

V ＝堆積體的體積(volume of assembly)；

K_n & K_s ＝正向及剪切勁度(normal and shear stiffness)。

上式中的 $\frac{4r^2N}{3V} = f(e)$=孔隙比的函數=常數，為了簡化分析，假設$\frac{4r^2N}{3V} = f(e) = 1$，則圖 2-4-12 及圖 2-4-13 分別為為$\frac{K_n}{K_s} = 3$，不同K_n值，對應巨觀組成律參數楊氏係數(E_v及 E_h)、剪力模數(G_{vh} 及 G_{hh})以及柏松比(ν_{hh}，ν_{vh}及ν_{hv})與組構異向性程度的關係圖。圖中顯示在

固定的$\frac{K_n}{K_s}$，增加K_n值會增大巨觀組成律參數中的楊氏係數(E_v及E_h)、剪力模數(G_{vh} 及 G_{hh})；但是柏松比(ν_{hh}，ν_{vh}及ν_{hv})並不會因的K_n值的增加或減少而改變。另外$a > 0$代表有較多的顆粒接觸點的方向(contact normal)偏向於垂直方向，因此有較大的 E_v 及 G_{vh} 和 G_{hh}，但是有較小的 E_h 及 G_{hh}。而$a < 0$代表有較多的顆粒接觸點的方向(contact normal)偏向於水平方向，因此有較小的 E_v 及 G_{vh} 和 G_{hh}，但是有較大的 E_h 及 G_{hh}。

圖 2-4-14、圖 2-4-15 及圖 2-4-16 別為固定的$K_n = 8000000N/m$，不同$\frac{K_n}{K_s}$值，對應巨觀組成律參數楊氏係數(E_v及E_h)、柏松比(ν_{hh}，ν_{vh}及ν_{hv})及剪力模數(G_{vh}、G_{hv}及G_{hh})以及柏松比(ν_{hh}，ν_{vh}及ν_{hv})與組構異向性程度的關係圖。圖中顯示在固定K_n值，增加$\frac{K_n}{K_s}$值會減少巨觀組成律參數中的楊氏係數(E_v及E_h)、剪力模數(G_{vh} 及 G_{hh})及柏松比(ν_{hh})；至於柏松比(ν_{hh}及ν_{hv})，在$a < 0$時，隨著$\frac{K_n}{K_s}$值的增加而增加；但是$a > 0$時，隨著$\frac{K_n}{K_s}$值的增加而減少，但是變化不大。PFC2D 運算過程中可以自行考慮組構的變化(a)，因此上述諸圖可以提供微觀參數與巨觀參數間的相互關係，有助於掌握 PFC2D 所需的微觀參數。

為了簡化問題，本研究假設堆積體為等向(isotropic granular assembly，a=0)，則式 2-4-5 至式 2-4-11 可改寫成下列諸式(式 2-4-12 至式 2-4-15)：

$$E = E_v = E_h = \frac{4r^2N}{9V}\left[\frac{15K_nK_s}{2K_n+3K_s}\right] \quad (2\text{-}4\text{-}12)$$

$$G = G_{vh} = G_{hv} = \frac{4r^2N}{9V}\left[\frac{15K_nK_s}{6K_n+4K_s}\right] \quad (2\text{-}4\text{-}13)$$

$$\nu = \nu_{vh} = \nu_{hv} = \frac{K_n-K_s}{2K_n+3K_s} = \frac{\frac{K_n}{K_s}-1}{(2\frac{K_n}{K_s}+3)} \quad (2\text{-}4\text{-}14)$$

$$K_s = \frac{1-2\nu}{1+3\nu}K_n \quad (2\text{-}4\text{-}15)$$

其中 $\frac{4r^2N}{9V} = f(e)$=孔隙比的函數

由上述四個方程式，可以推論巨觀參數的柏松比僅和K_n/K_s的比值有關，而楊氏係數及剪力模數則同時跟K_n及K_s有直接的關係。因此式 2-4-12 至式 2-4-15 提供了等向堆積體巨

觀參數及微觀參數間的相互關係。假設$\frac{K_n}{K_s}=c$，則$\nu=\frac{c-1}{2c+3}=d$；$E=\frac{4r^2N}{9V}\frac{15K_n}{3+2c}$。由前節的討論，固定的$K_n/K_s$的比值，則柏松比固定，E 值僅和$K_n$有關。

PFC2D 既無法模擬平面應變的問題，也無法模擬平面應力的問題。因此在模擬試驗箱長軸方向，無側向應變的問題時，僅考慮在平面上的應力(in-plane stress)，而垂直平面上(out of plane)的應力則不予考慮，所以垂直應變，ε_v。

$$\varepsilon_v=\frac{\sigma_v}{E}-\nu\frac{\sigma_h}{E} \tag{2-4-16}$$

$$\because\ \varepsilon_h=\frac{\sigma_h}{E}-\nu\frac{\sigma_v}{E}=0 \tag{2-4-17-a}$$

$$\therefore\ \sigma_h=\nu\sigma_v \tag{2-4-17-b}$$

$$\varepsilon_v=\frac{\sigma_v}{E}-\nu^2\frac{\sigma_v}{E} \tag{2-4-18}$$

其中ε_h =水平應變；E=楊氏係數；ν =柏松比；σ_v ， σ_h =垂直及水平應力。

數值模擬時的束制模數(constrained modulus),M_{PFC},的定義如下：

$$M_{\mathrm{PFC}}=\frac{\sigma_v}{\varepsilon_v}=\frac{1}{(1-\nu^2)}E=\frac{1}{(1-d^2)}\frac{4r^2N}{9V}\frac{15K_n}{3+2c}=f(e)AK_n \tag{2-4-19}$$

其中 A 為常數。

考慮離心模型試驗時，當離心模型升 g 過程中，試體在試驗箱長軸及短軸方向均無側向應變，處於 K_o 狀態，因此：

$$\varepsilon_v=\frac{\sigma_v}{E}-2\nu\frac{\sigma_h}{E} \tag{2-4-20}$$

$$\because\ \varepsilon_h=\frac{\sigma_h}{E}-\nu\frac{\sigma_h}{E}-\nu\frac{\sigma_v}{E}=0 \tag{2-4-21-a}$$

$$\therefore\ \sigma_h=\frac{\nu}{1-\nu}\sigma_v \tag{2-4-21-b}$$

$$K_o=\frac{\nu}{1-\nu}=1-sin\phi' \tag{2-4-21-c}$$

利用試驗砂床的內摩擦角，可以求得在靜止土壓力狀態下的柏松比。

離心模擬時的束制模數 $M_{centrifuge}$ (constrained modulus)的定義如下：

$$M_{centrifuge} = \frac{\sigma_v}{\varepsilon_v} = \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}E = \frac{(1-d)}{(1+d)(1-2d)}\frac{4r^2N}{9V}\frac{15K_n}{3+2c} = f(e)BK_n \quad (2\text{-}4\text{-}22)$$

其中 B = 常數。因此不論是 $M_{centrifuge}$ 或 M_{PFC} 都跟 K_n 成正比。在不同 g 值情況下，$M_{centrifuge}$ 可以由離心模型試驗求得。因此利用 PFC2D 進行試驗砂床自重壓密階段(1g-80g)的模擬，可以以不同的微觀參數進行數值試驗，直至計算得到的 $M_{PFC} = M_{centrifuge}$ 才停止。因此離心物理模型試驗及 PFC2D 數值試驗可以相輔相成，相互校正。

巨觀的束制模數，M，與圍束應力或有效垂直覆土應力(σ_z)的經驗關係式，可以利用下式來表示：

$$M = N\sigma_z^m \quad (2\text{-}4\text{-}23)$$

其中 N 為常數；m 為經驗值，一般而言介於 0.4~0.5 間。因此在數值模型中可以合理假設不同深度處的K_n亦隨著σ_z^m的增加而增加。本研究試驗採用石英矽砂，滑動模式所需的微觀參數，$\mu = \tan\phi_\mu = \tan 25° = 0.466$。

本研究 PFC2D 數值模擬所使用顆粒的篩分析曲線與試驗石英矽砂的篩分析曲線如圖 2-4-17 所示。由於電腦儲存空間及運算時間的限制，本研究採用篩分析曲線平行移動的方式，放大顆粒尺寸約 20 倍。顆粒半徑分別為 1.49mm、1.05mm 及 0.74mm，其中顆粒半徑 1.49mm 佔全體重量 90.2%、顆粒半徑 1.05mm 佔全體重量 5.5%、顆粒半徑 0.74mm 佔全體重量 4.3%。利用這三種不同粒徑的顆粒來堆積試驗砂床，進行 PFC2D 的數值模擬。首先利用數值方法來模擬砂床的堆積，其建立步驟如下：

(1) 設置兩側牆邊界及底板，牆高 1m，兩側牆間的距離 1m。此距離較離心模型的長邊距離(74cm)長。選擇數值模型有較長的邊長是為了未來利用數值模型模擬不同的斷層錯動角度(dip angle)，不會有邊界效應(boundary effect)。較平緩的斷層錯動角度需要較長的兩側牆間的距離，離心模型受限於空間的限制，無法模擬較平緩的斷層錯動角度。

(2) 將牆高分 50 層，每層厚度 20mm。於各分層填入均勻混和大小不同粒徑的圓盤(circular disk)。每分層填入半徑 1.49mm 的圓盤共 1200 顆，半徑 1.05mm 的圓盤共

147 顆，半徑 0.74mm 的圓盤共 232 顆。

(3) 製作完成的圓盤堆積，進行自重平衡，直至不平衡力比小於 0.01 才停止。

(4) 將堆積完成的圓盤堆積選取底部 20cm 作為分析對象，來模擬基盤斷層錯動對覆土砂層的影響。本研究數值模擬的砂床共有半徑 1.49mm 的圓盤共 21831 顆，半徑 1.05mm 的圓盤共 2684 顆，半徑 0.74mm 的圓盤共 4244 顆。該堆積整體共有圓盤 28759 顆，視孔隙率 0.156。

建構的數值模型的邊界條件如圖 2-4-18(a)及圖 2-4-18(b)所示，而建構的正斷層數值模型的邊界條件如圖 2-4-18(c)所示。逆斷層數值模擬試體床高度為 20cm(與物理模型之試體床高度相同)，分成 10 個子層。每一子層高度 2cm，每一子層可以考慮覆土應力的大小，依據式 2-4-23 的經驗式，分別輸入隨深度增加而增加的微觀參數，K_n。本研究首先進行 20cm 的試體床，由 1g 升至 80g 進行數值模擬自重壓密數值試驗(self-weight consolidation numerical test)，來計算數值地盤的地表沈陷量。由式 2-4-21-c 可以得到試體床的內摩擦角約 38°，因此止土壓力係數 K_o=0.32，因此$\nu = 0.24$，另外由式 2-4-14 可以得到$\frac{K_n}{K_s} = 3.3$。

本研究首先選定固定的$\frac{K_n}{K_s} = 3$，石英砂的基本摩擦角，$\mu = \tan(25°)$ =0.466，改變不同的K_n值以及不同的 m 值，進行 PFC2D 的自重壓密的數值試驗。數值試驗時，固定 m 值，改變不同的K_n值作為 PFC2D 的第三個微觀參數，來計算地表在升 g 過程中不同的K_n值所對應的地表沈陷量。不同 g 值狀態下自重壓密的數值模擬，係採用倍數增加圓盤密度方式來模擬，例如模擬 10g 值狀態下自重壓密數值試驗，圓盤密度則輸入 10ρ，ρ為圓盤的密度。

圖 2-4-19 為假設在覆土應力等於 0.155kN/m^2 時，$K_n = 0.58 \times \frac{10^7 N}{m}$條件下，離心模型試驗的地表沈陷與 PFC2D 數值試驗（m 分別為 0.2，0.4，0.5）地表沈陷的比較。圖中顯示隨著K_n的增加(m 減少)，地表沈陷量逐漸減少，當 m=0.4 可以得到最佳的符合程度。因此可以合理推定$K_n = 0.58 \times \frac{10^7 N}{m}$，$\frac{K_n}{K_s} = 3$，及$\mu$ =0.466，利用這三個微觀參數，以及本研究所建立的數值模型可以用來模擬離心正斷層或逆斷層錯動模型的試驗成果。

圖 2-4-20(a)為 PFC2D 數值試驗$\mu = \tan 25° = 0.466$與 80g 物理模型試驗(80gRtest23)

之成果比較，在較小的上升錯動量（小於 15%的上覆土層厚度）與 80g 物理模型試驗(80gRtest23)之成果可以得到相當一致的結果，可是在較大的上升錯動量，則顯示 PFC2D 的計算成果有較平緩的邊坡，有更多的砂土崩落於坡腳，而 80g 物理模型試驗成果則有較陡的邊坡。造成此差異的原因可能是本研究假設 PFC2D 的微觀參數μ等於石英的基本摩擦角=25o 較低所導致。本研究離心模型試驗所使用的試驗用砂是磨碎細砂(crushed sand)，砂顆粒表面粗糙，導致砂顆粒基本摩擦角較大。圖 2-4-20(b)則採用微觀參數 $\mu = \tan 30° = 0.577$，與 80g 物理模型試驗(80gRtest23)之成果比較，圖中顯示與離心物理模型試驗(80gRtest23)之地表變形剖面可以得到相當一致的模擬成果。圖 2-4-20(c)則採用微觀參數μ=tan36^{o}=0.726，與 80g 物理模型試驗(80gRtest23)之成果比較，圖中顯示與離心物理模型試驗(80gRtest23)之地表變形剖面也可以得到相當一致的模擬成果。本研究最終選定的 PFC2D 的微觀參數為$K_n = 0.5 \times \frac{10^7 N}{m}$，$\frac{K_n}{K_s} = 3$，及$\mu = \tan 36 = 0.726$，做為未來 PFC2D 數值試驗的微觀參數。

表 2-4-5 參數矩陣

參數	斷層傾角	覆土層厚度	生長地層層數
斷層傾角	30°、45°、60°、75°	20cm	0 層
覆土層厚度	75°	20cm、30cm、40cm	0 層
生長地層層數	75°	20cm	0 層、1 層、2 層、3 層、10 層

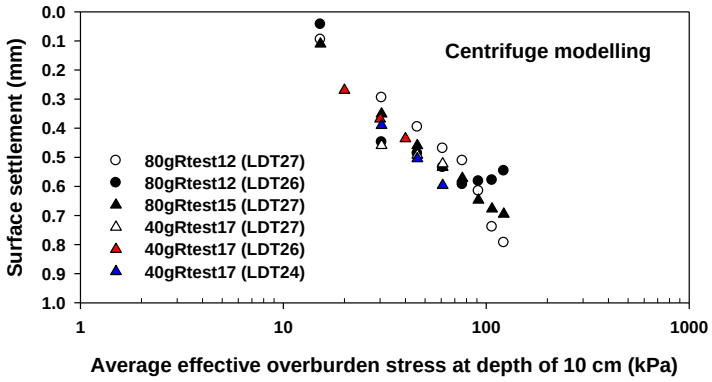


圖 2-4-10 離心模型試驗飛行階段的地表沈陷與有效覆土應力的關係（Dr=70%）

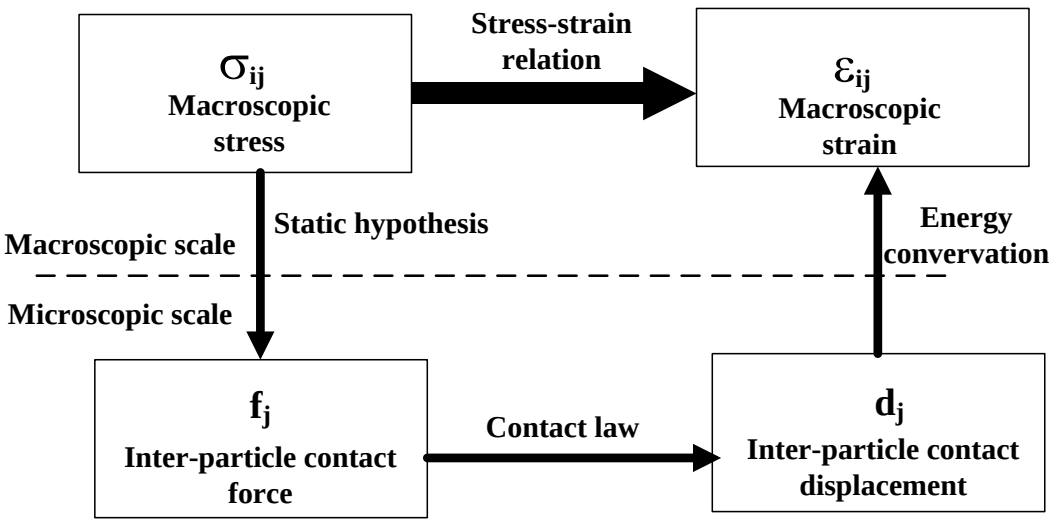


圖 2-4-11 微觀模式組成率與巨觀模式組成率間的關係

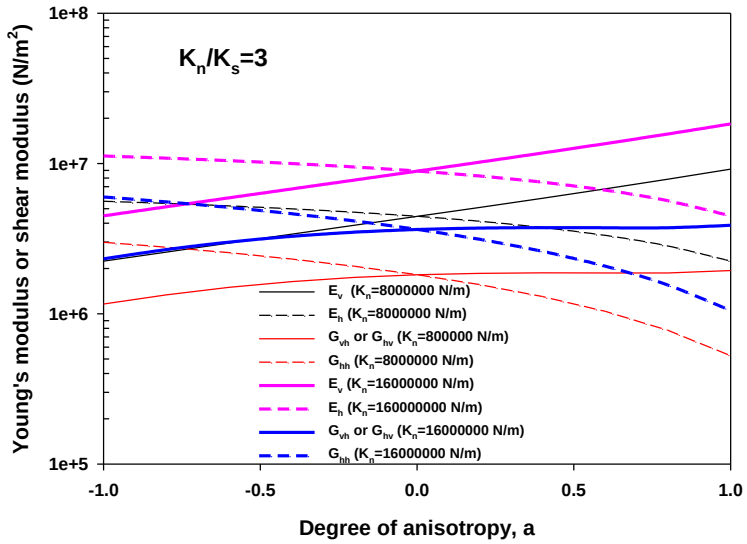


圖 2-4-12 $\frac{K_n}{K_s} = 3$，不同的K_n值，與楊氏係數(E_v 及 E_h)及剪力模數(G_{vh} 及 G_{hh})與異向性程度的關係

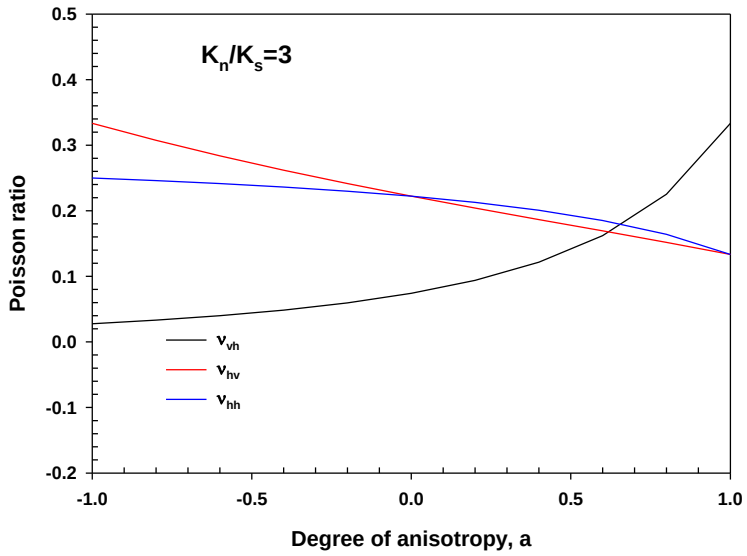


圖 2-4-13 $\frac{K_n}{K_s} = 3$，不同的K_n值，與柏松比(ν_{hh}，ν_{vh}及ν_{hv})與異向性程度的關係

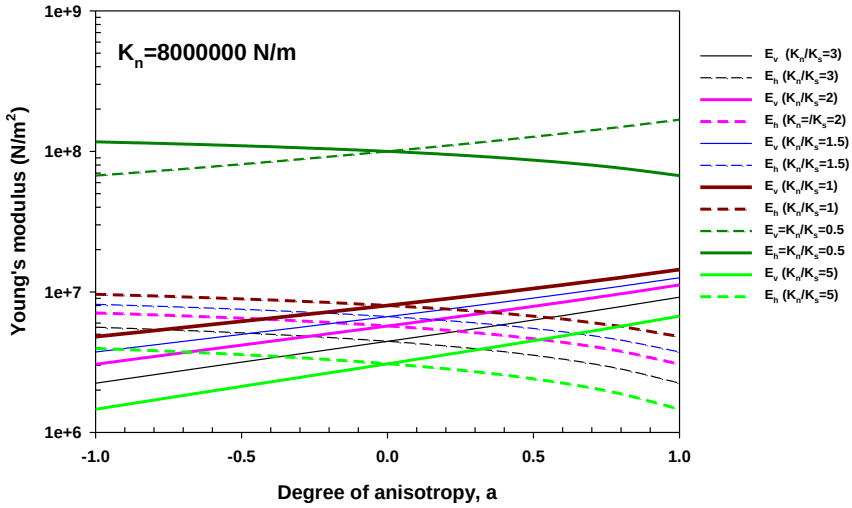


圖 2-4-14 $K_n = 8000000 N/m$，不同的$\frac{K_n}{K_s}$值，與楊氏係數(E_v 及 E_h)與異向性程度的關係

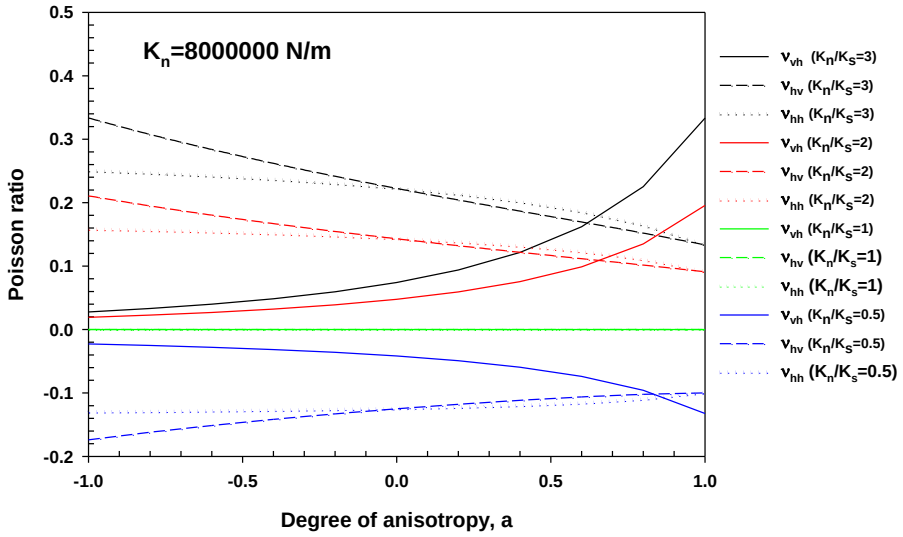


圖 2-4-15 $K_n = 8000000 N/m$，不同的$\frac{K_n}{K_s}$值，與柏松比(ν_{hh}，ν_{vh}及ν_{hv})與異向性程度的關係

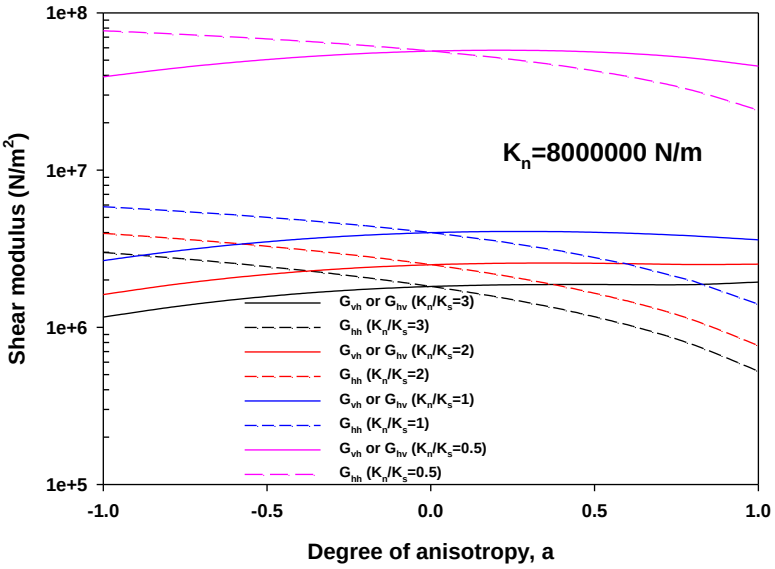


圖 2-4-16 $\mathrm{K}_n = 8000000 N/m$，不同的$\frac{\mathrm{K}_n}{\mathrm{K}_s}$值，與剪力模數($G_{vh}$ ，G_{vh}及 G_{hh})與異向性程度的關係

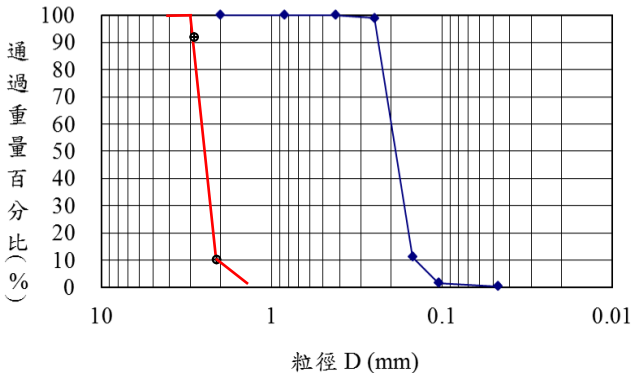


圖 2-4-17 數值模擬所使用顆粒的篩分析曲線與試驗石英矽砂的篩分析曲線之比較

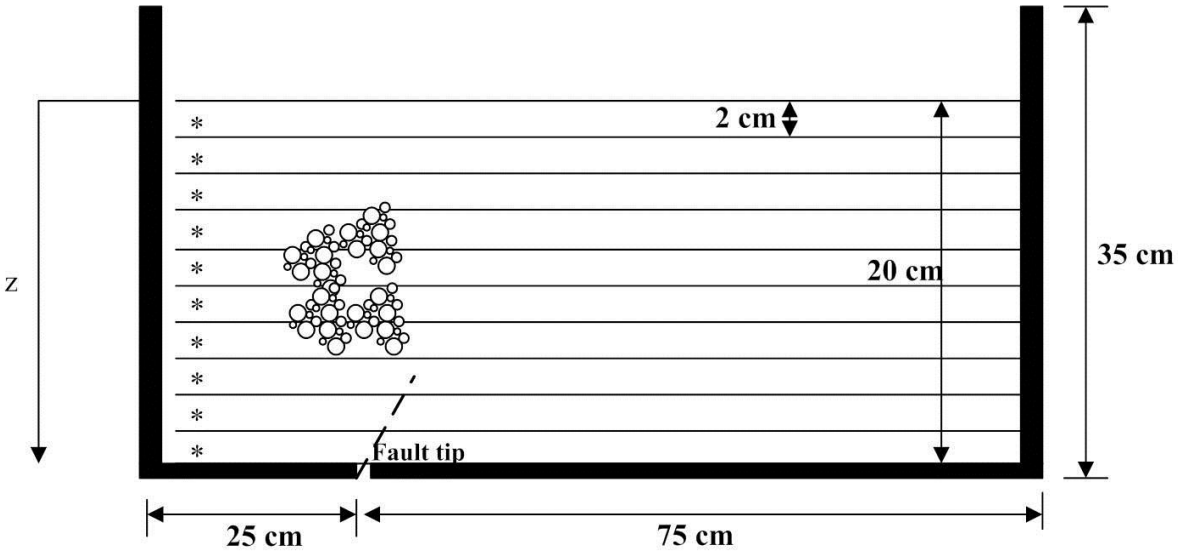


圖 2-4-18(a) 建構完成後的數值試驗模型

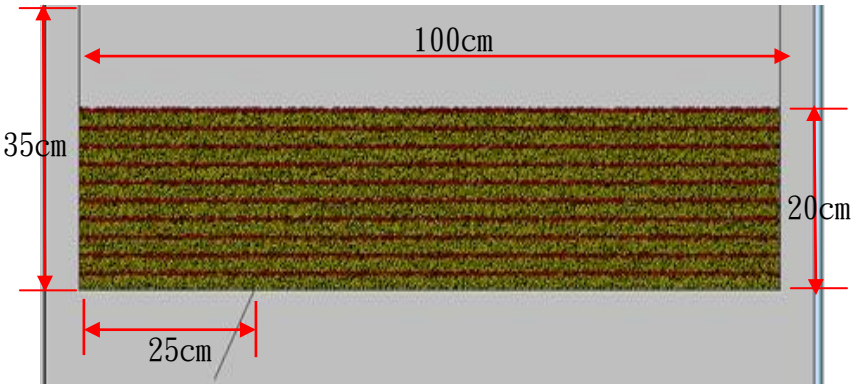


圖 2-4-18(b) 建構完成後的數值試驗模型及分層示意圖

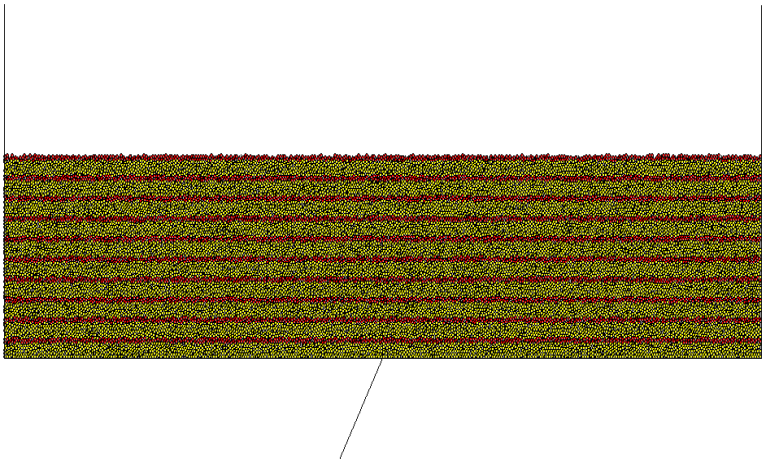


圖 2-4-18(c)建構完成後的正斷層數值試驗模型及分層示意圖

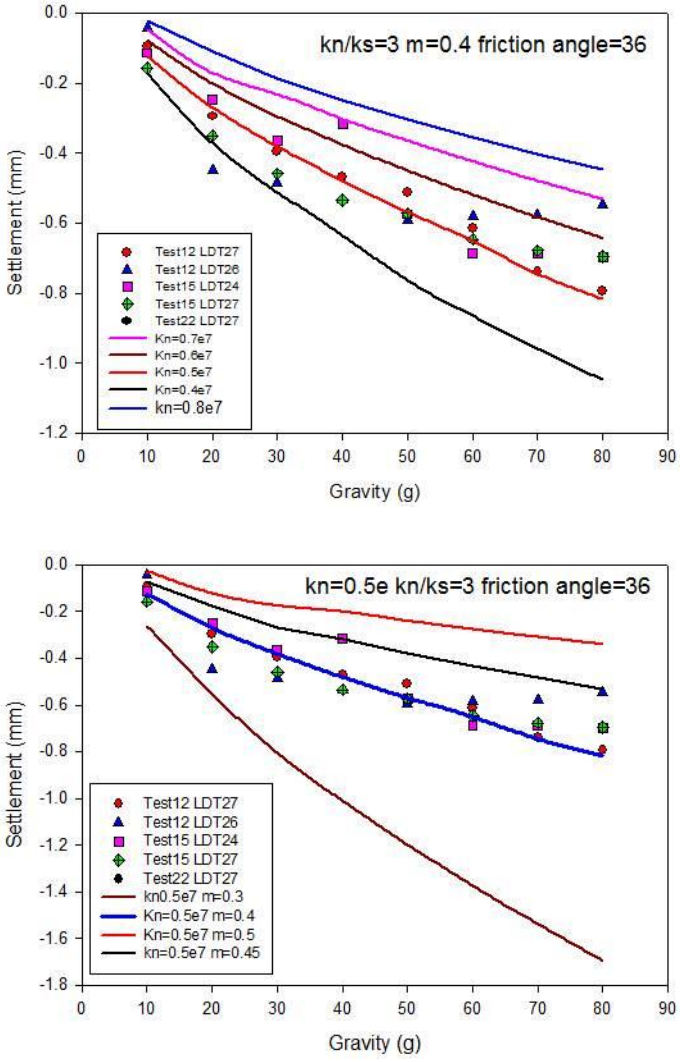
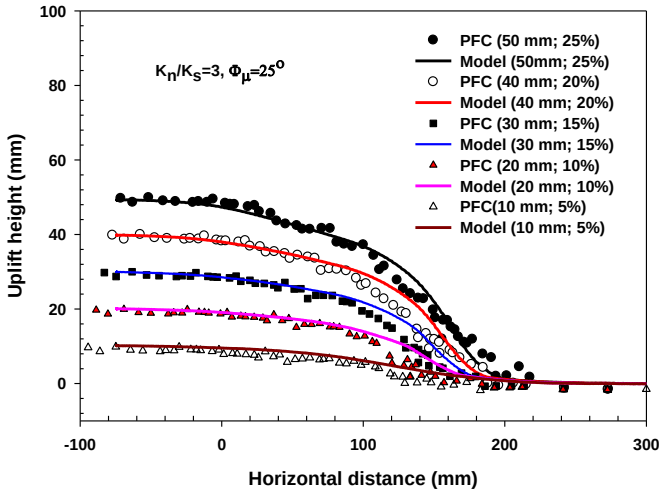
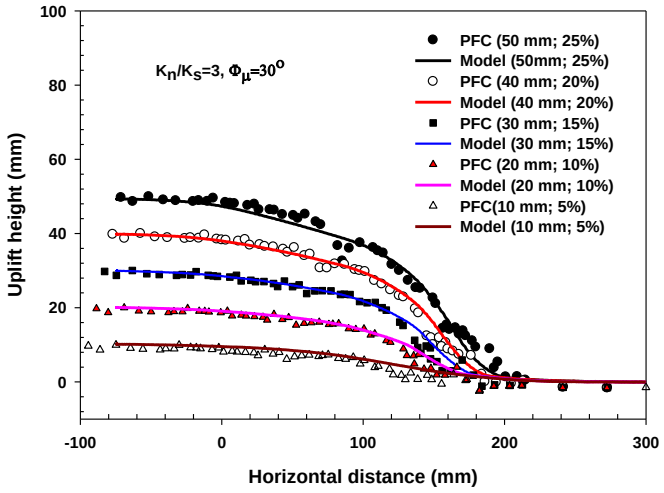


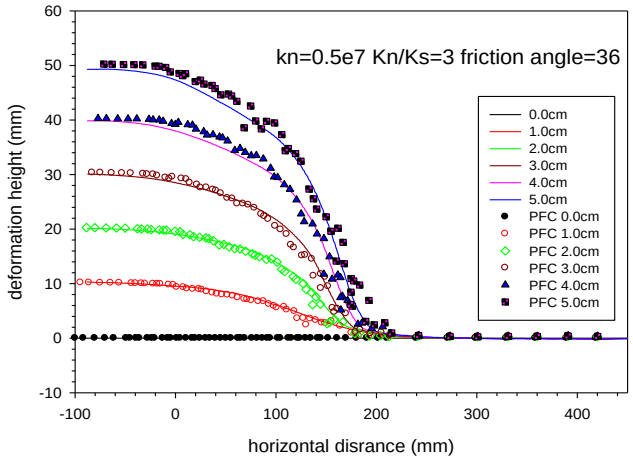
圖 2-4-19 離心模型試驗的地表沈陷與 PFC^{2D} 數值試驗地表沈陷的比較



(a)ϕ_μ=25°



(b)ϕ_μ=30°



(c)ϕ_μ=36°

圖 2-4-20 不同錯動量下，離心機試驗的地表沈陷與 PFC2D 模擬地表變形剖面之比較

2.5. 斷層帶中應變集中帶的定義

Erslev(1991)年提出三角剪切帶理論，來解釋斷層基盤錯動時引致上覆土層的變形時的變形範圍，其基本的假設土層裡的剪切帶是由上邊界、下邊界和斷層破裂尖端圍成一個三角形的剪動帶(圖 2-5-1)，然而，從現地調查、砂箱實驗及數值模擬的現象中我們可觀察到斷層錯動時除了剪切帶之外，剪切帶內也會有數個破裂面，這個破裂面上的剪應變相較於整個剪切帶裡的剪應變是更高的，因此本研究中又稱之為應變集中帶，當應變集中帶發展到地表的時候，就會扯裂或傾覆地表的結構物，如果應變集中帶遇到強度較大的結構物時，也有可能會繞過結構物。因此，如何找到應變集中帶並說明它的發展是一個相當重要的課題。

在現地調查的部份，最明顯找到應變集中帶的方法是從岩心資料裡去研判，中央地質調查所年報(1998)指出在地質鑽井 SCF-2 中可以看到受山腳斷層拖曳作用而傾斜及剪動的現象，如圖 2-5-2 所示，在這個範圍內的土層變形得很厲害，很有可能就是應變集中帶。

在砂箱實驗中，砂箱試驗過程中隨著基盤抬昇過程中斷層面發展之情形，如圖 2-5-3 所示。由於基盤抬昇過程中砂土顆粒本身受到剪動時，會產生顆粒間重新排列或剪動之現象，因此將實驗過程中會鋪設染色砂層來作為標誌層，由標誌層發生扭曲或剪動之現象，定義斷層面已發展至某一位置及範圍，依此可描繪出斷層面發展之情形及斷層面遷移行為。然而此一位置僅能表現出三角剪切帶中出剪應變最集中的區域，無法展示出整個三角剪切帶。

在數值模擬中觀察剪切帶及應變集中的方式有兩個，第一個與砂箱實驗的方法一樣，即在 PFC2D 的模擬中給予顆粒不同的顏色形成染色砂層，透過染色砂層發生扭曲或剪動之現象來定義應變集中帶之位置及範圍，如圖 2-5-4 所示。另外則是透過計算網格剪應變，並以不同顏色表示不同剪應變之方式來呈現，如圖 2-5-5 所示，不同的顏色代表網格之剪應變達到了各自的門檻植，才會以該顏色展示，由這個方法可以看到土層中剪切帶之位置及範圍，而如果將門檻值提高的話，也可以看到應變集中帶的位置及範圍，如圖 2-5-5 中的紅色區域即為剪應變最集中的區域。

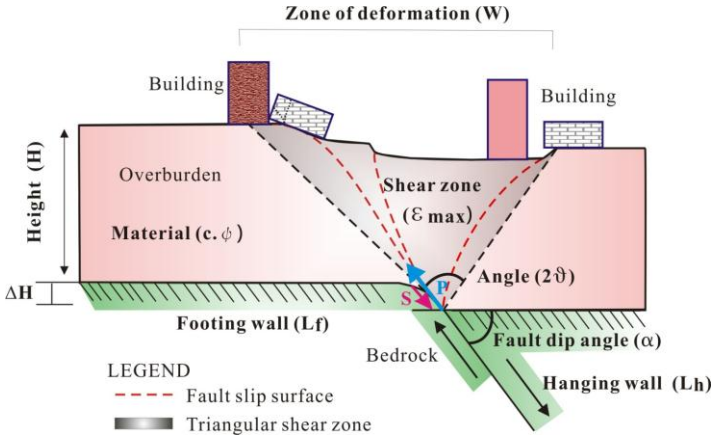


圖 2-5-1 正斷層作用引致上覆土層斷層擴展及擴展路徑示意圖



（中央地調所，1998）

圖 2-5-2 鑽井 SCF-2 顯示山腳斷層上盤台北盆地第四紀沉積物物傾斜及擾動情形

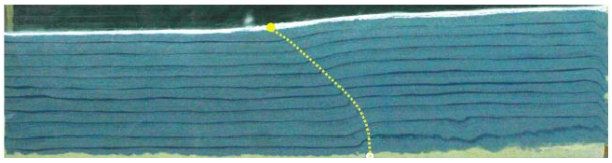


圖 2-5-3 砂箱實驗中應變集中帶之發展情形。黃色點代表斷層尖端

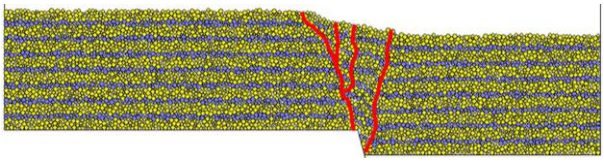


圖 2-5-4 數模擬中應變集中帶之發展情形

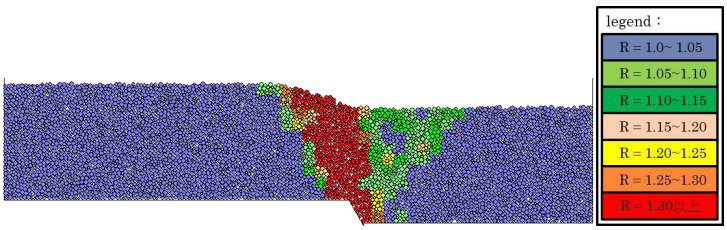


圖 2-5-5 數模擬中剪切帶及應變集中帶之發展情形

第三章 計畫成果

3.1. 現地查核

i. 三腳斷層在基盤分佈的特性

中央地質調查所(2011)利用五公尺 DEM 針對山腳斷層地表地形特徵進行初步判釋，從樹林到關渡沿線地區，可見明顯的地形崖，這地形崖的延續性較關渡到金山良好，且與主要的河流作用方向約呈垂直，所以此地形崖亦更可能為斷層崖，但是否為斷層崖則需要更多其他的直接證據來証實，例如震測剖面、鑽井岩芯資料等。地形崖可細分為 3 小段，分段點位於五股與麻竹坑附近。李錫堤(2001)利用鑽井岩心等井下資料將其分成 2 小段，分段點位於五股附近，顯示無論是分段數或分段位置並不一致，且過去研究較明確之正斷層證據皆僅在沖積層以下，就斷層線西側，丹桂之助(1939)認為的台地與臺北盆地之間的地形崖並沒有找到明顯的斷層崖證據。而這些未固結的沉積物所構成的平坦地面即為台北都會區發展的重心所在。然而過去我們對於這些沖積層的厚度變化，以及基盤是否授正斷層作用形成數量不一的陷落崖面，所知有限。

本研究分別透過鑽井岩心資料與幾何學方法，了解大地應力改變，山腳斷層-金山斷層系統的分段與錯動量，研究區域為山腳斷層南段，並利用過去地調所之研究剖面，包含成子寮剖面、五股剖面及樹林剖面，並增列丹鳳剖面，如圖 3-1-1 所示，以探討斷層可能的分段型態。山腳斷層南段的地質鑽探結果，包括建立成子寮、五股、樹林等剖面，另本研究增列丹鳳剖面，透過第三紀基盤紀錄彙整如表 3-1-1，各剖面依照基盤深度繪製成 1:1 剖面圖如圖 3-1-2 所示，透過剖面得知，由北到南構造傾角數量：成子寮剖面-2 個、五股剖面-2 個、丹鳳剖面-5 個、樹林剖面-1 個，其中選定各剖面主要陷落崖面，進行全區構造推論，主要陷落崖面於表 3-1-2 粗體表示之構造傾角。

在鑽井岩心方面，討論第三系基盤等深線與過去古地形面，並將地形崖坡與構造崖坡分開討論，嘗試了解正斷層作用開始的初始地形面，利用各鑽孔間距與基盤高程差異的對比，探討斷層可能崖坡傾角與基盤高程關係；結合鑽井資料與幾何模型，探討正斷層陷落可能的分支類型。首先針對各別剖面比對各鑽井岩心基盤深度的變化，當與斷層大致正交

的相鄰鑽孔內之基盤陷落崖坡(ramp)達 30 度以上，即推論此基盤落差應為正移斷層構造活動作用造成，相鄰鑽孔是跨在某山腳斷層基盤之分段斷崖之上，而有別於古地形面(麓山帶地區山麓前緣地區之古地形面坡度小於 30 度)，基盤陷落崖(ramp)設定為構造面邊坡，古地形面設定為地形面，因此可利用角度推論可能的剖面成因。

另外，利用平行斷層的岩心資料，尋找幾處可能的陷落中心，並進一步利用井下資料之岩土界面位置、深度及土層中沉積特徵，推測解釋各種可能分段方式的可能性。再比對垂直剖面斷層岩心資料的崖坡位置與數量，各剖面斷層崖坡數量不一，可能為山腳斷層破裂至地表時形成的分支，如花狀構造，故近地表破裂數量會不一致，因此有可能有 Fault relay 存在，只是現今可能已被第四紀沉積物所掩蓋。

比對垂直剖面斷層岩心資料的崖坡位置與數量，由北到南主要分支數量分別是 2-1-2-1，繪製到地形圖，可推測正斷層四種不同斷層分支陷落類型的可能性，如圖 3-1-3 所示，由圖可知，斷層於台北盆地西緣，有不同的分支數量與長度，其長度皆小於地調所定義之山腳斷層南段 13 公里，斷層破裂跡越短，其致災範圍越小，但本研究僅就基盤深度進行討論，若要深入了解，必須透過地層間比對，包含沉積層厚度以及地層定年資料，才能更加確認構造作用成因。

表 3-1-1 本研究參考地調所之地質鑽井與基盤深度

名稱	鑽探深度(m)	基盤深度(m)	名稱	鑽探深度(m)	基盤深度(m)
WK-1E	760	679	BF-1	275	254
BH-10	75	5.8	BF-2	105	64.5
B-45	40	35.4	BF-3	200	18.95
B-46	39	35.5	BF-4	200	144
B-47	30	25	SCF-1	60	45.1
B-48	27	22.6	SCF-2	165	164
B-49	30	22.58	SCF-5	181	122
B-50	30	17.4	SCF-6	400	222
B-51	35	9	SCF-14	200	158
B-52	30	11.5	SCF-15	80	52
B-53	30	7.1	SCF-16	160	137
			SCF-17	240	214

表 3-1-2 各剖面古地形傾角(β)與構造傾角(α)

剖面	古地形傾角(β)	構造傾角(α)
成子寮	13°	**26°**、**50°**
五股	?	25°、**33°**
丹鳳	11°、15°	39°、**69°** **54°**、24°
樹林	7°、8°	**20°**

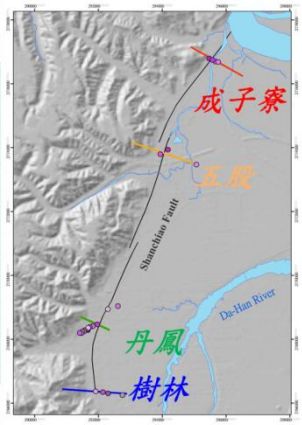
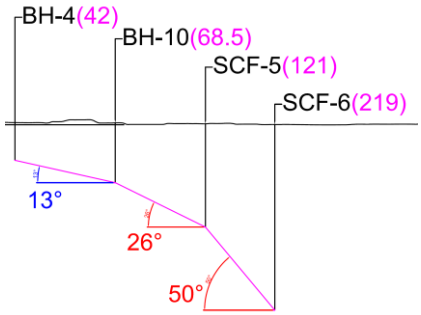
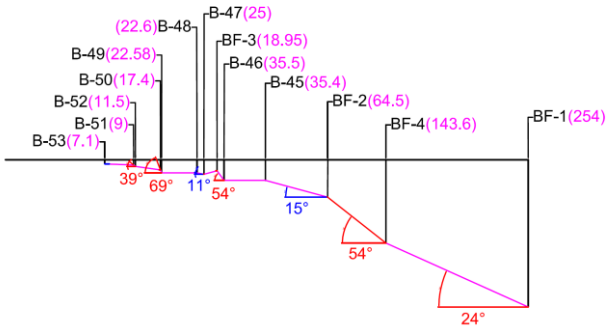


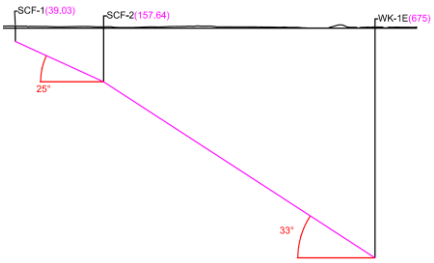
圖 3-1-1 研究區域鑽井與剖面位置圖



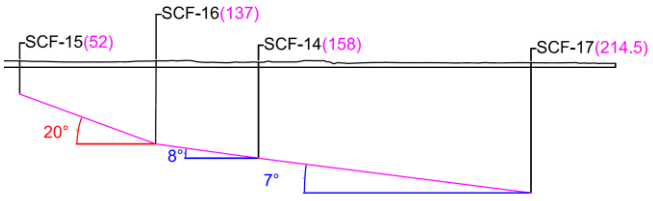
(a)成子寮剖面



(c)丹鳳剖面



(b)五股剖面



(d)樹林剖面

圖 3-1-2 基盤深度剖面(a)成子寮(b)五股(c)丹鳳(d)樹林

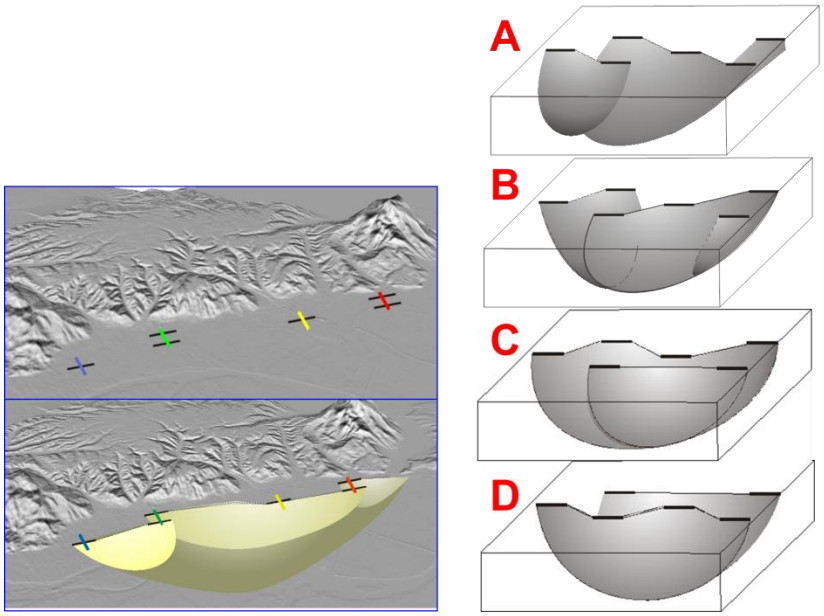


圖 3-1-3 可能的斷層分支型態

3.1.2. 山腳斷層鑽探資料統計

由於山腳斷層分佈範圍較廣，因此僅先就目前蒐集到的資料進行分析與整理，主要來源為台北市仙渡超高壓變電所工程之大地工程鑽探資料，共分為二期，第一期為皇昌營造公司之資料，共 38 個鑽孔，第二期補充鑽探則由富國工程技術公司提供，共 9 個鑽孔。鑽探報告內同時亦提供常見之室內試驗資料，如一般物性等資料，以及相關力學試驗(如直剪試驗、三軸試驗、無圍壓縮試驗等)所得之強度參數，因此，本研究將使用上述資料協助簡化土壤分層以及參數之選定，另外，鑽探報告內亦提供標準貫入試驗值，因此，若與分析相關之力學參數無適合力學試驗結果可供參考，則將以經驗公式配合適當之判斷，決定所需使用之參數。仙渡超高壓變電所所在位置如圖 3-1-4 所示，鑽孔所在位置皆位於山腳斷層下盤處，鑽孔距離山腳斷層線約 35 公尺至 230 公尺之間，鑽探深度大多位於地表下 43 公尺到 79 公尺之間。

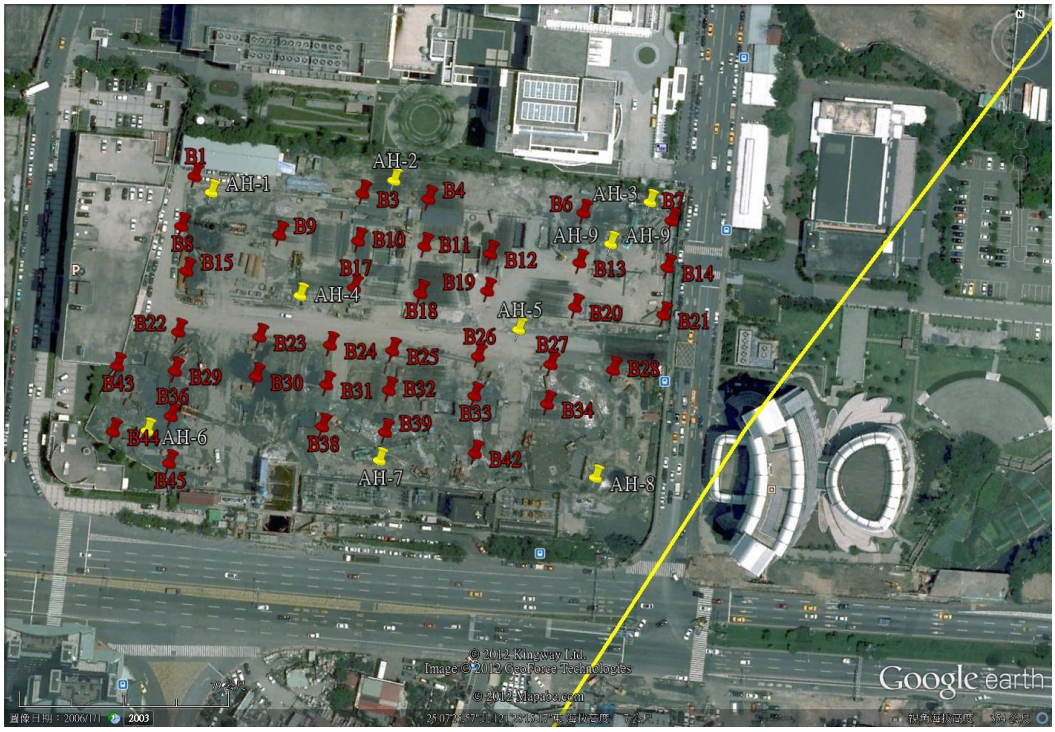


圖 3-1-4 山腳斷層沿線仙渡超高壓變電所基地鑽探位置圖(直線段為山腳斷層線)

經檢視鑽探資料，此處地層在淺層部分(地表到地表下 3 公尺處)大約為粉土質砂及部分回填土，地表下 3 公尺處到約地表下 50 公尺處大多為黏土層，含粉土質細砂，地表下 50 公尺處到地表下 80 公尺處為黏土層與砂土層，開始有岩塊碎屑出現，地表下 80 公尺以下為岩盤，詳細地層分佈狀況見表 3-1-2 所示。

而根據鑽探資料以及試驗資料，此處地層一般物性分佈隨高程變化如圖 3-1-5(a)到(h)所示。其中由細粒料含量 (小於 200 號篩之顆粒重量比例)圖可以明顯看出，由地表到地表下約 10 公尺深處，其細粒料含量分佈較廣，但大多屬於小於 50%之含量，屬砂性土壤偶夾粉土或黏土層，另外，由孔隙比(0.5 到 1)或是標準貫入試驗值之變化(4 到 15 左右)亦可看出地層構造屬於相對疏鬆至中等緊密之分佈；由於砂性土壤吸附水之能力較黏土差，因此，由含水量的變化亦可以看出從地表至地表下 10 公尺處之土壤性質與其下方之土層性質差異頗大。由於此層土壤較偏向砂性土壤，因此其塑性指數較難以定義，若局部土壤含有較多之細粒料土壤，則其塑性指數較能以實驗求得，如圖 3-1-5(g)所示。其次，總單位重或是乾單位重之變化較難以從地層之變化看出之差異，但是地表到地表下 10 公尺之土壤單位重分佈範圍與其他層土層亦有約略不同之分佈情形。

再者，地表下 10 公尺到約 40 公尺處，由細粒料含量可以明顯看出此層之細粒料含量接近 100%，說明此處地層大部分為含粉土或黏土質之土壤，再對照鑽探報告亦可以看出，此一粉土或黏土層夾雜少量砂土，由標準貫入試驗值可以看出其隨深度增加之趨勢，淺層部分之標準貫入試驗值指出較為軟弱之構造，而隨著深度增加，其強度隨之上升，另外，塑性指數位於 12 到 22 之間，大多屬低塑性黏土(CL)，其餘一般物性參數可參照圖 3-1-5(a)到(h)。另外，針對地表下 40 公尺以下之地層，若檢視標準貫入試驗值隨深度之變化，則可以看出其值會隨深度而增加，但是在地表下 50 公尺處附近以下，其標準貫入試驗值變化則較為複雜，其次，由資料中亦無法看出岩盤所在位置，因此，經檢視該基地之補充鑽探資料之標準貫入試驗值可以得知，該處岩盤約略位於地表下 80 公尺處，因此，地表下 40 公尺到 80 公尺處為粉土及黏土質土層，夾雜較多(相較於上層)之砂土及岩屑，且與上層土層比較，其含水量有降低之趨勢，地表下 80 公尺以下經檢視鑽探報告及標準貫入試驗值可以得知，此處地層偏向火山角礫岩，與上層土層有明顯差異，如圖 3-1-5(h)所示。

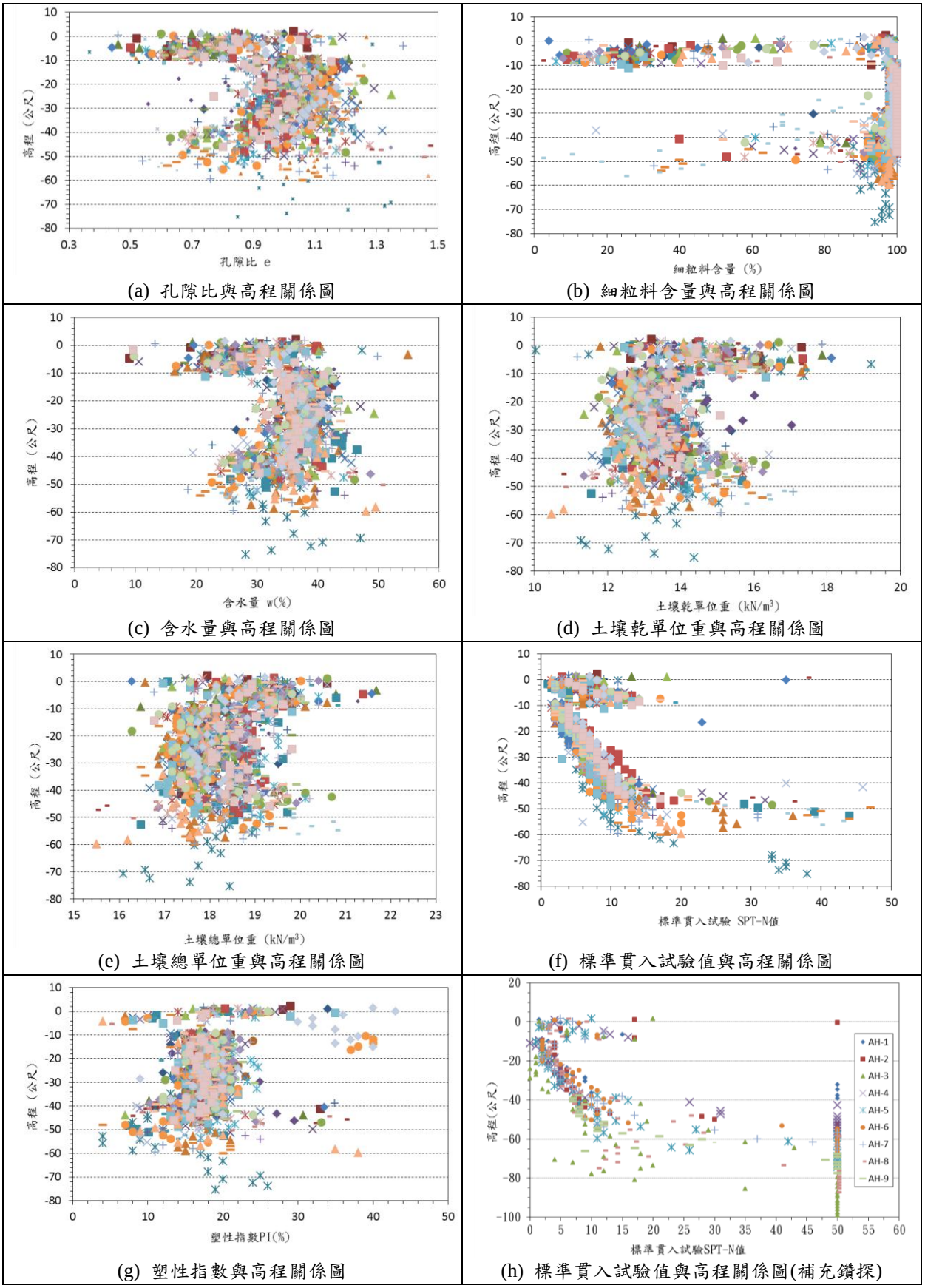
表 3-1-3 山腳斷層沿線仙渡超高壓變電所基地地層分佈表

深度(公尺)	地層描述
0 ~ 3	灰色混凝土塊夾黃棕色粉土質細砂及岩塊回填層
3 ~ 6	灰色,粉土質黏土偶夾高塑性黏土,軟弱至稠密
6 ~ 14	灰色,粉土質細砂,偶夾粉土質黏土薄層,極鬆散至中度密實
14 ~ 50	灰色,粉土質黏土,偶夾少量貝屑及細砂,軟弱至中度稠密
50 ~ 60	灰色,砂質粉土及黏土,稠密至極稠密，偶夾岩塊碎屑
60 ~ 80	灰黑色轉黃紅棕色黏土質粉土，偶夾岩塊碎屑
80 ~	紅灰色及灰色火山角礫岩

基於上述之討論以及各土層之物理及力學性質分佈圖，建議山腳斷層於仙渡超高壓變電所附近土層簡化如表 3-1-4 所示：

表 3-1-4 山腳斷層於仙渡超高壓變電所附近地層簡化表

地層深度 (m)	描述	飽和單位重 (kN/m^3)	SPT-N	Cu	ϕ(度)	E(kPa)	υ
0 ~ 10	灰色粉土質細砂層，偶夾粉土質黏土薄層	19 (std: 0.8)	9 (std:4)	0 kPa	33	3800 (std: 1100)	0.3
ϕ為以經驗公式所得之推估值，(*)為另參考試驗資料							
10 ~ 40	灰色粉土質黏土層，偶夾少量貝屑及細砂	18 (std: 0.7)	7 (std:3)	45 kPa (std: 16)	0(*)	6400 (std: 1900)	0.4
Cu 及 E 以經驗式推估，並參考試驗資料而得 ，(*)為假設值							
40 ~ 80	灰色砂質粉土及黏土層，偶夾岩塊碎屑	18 (std: 1.0)	24 (std:10)	85 kPa (std: 15)	0(*)	14200 (std: 4000)	0.4
Cu 及 E 以經驗式推估，(*)為假設值							
80 ~	岩盤 (火山角礫岩)	24.8	50	-	-	-	-
單位重參考岩石試驗數據							



(a) 孔隙比與高程關係圖　(b) 細粒料含量與高程關係圖

(c) 含水量與高程關係圖　(d) 土壤乾單位重與高程關係圖

(e) 土壤總單位重與高程關係圖　(f) 標準貫入試驗值與高程關係圖

(g) 塑性指數與高程關係圖　(h) 標準貫入試驗值與高程關係圖(補充鑽探)

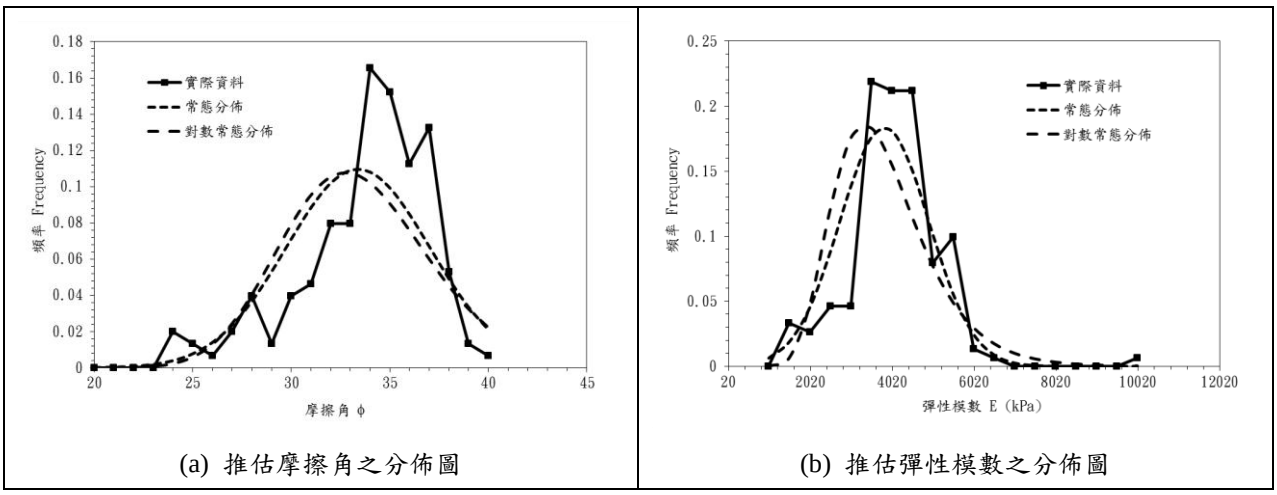
圖 3-1-5 土層物理性質及力學性質隨高程變化圖

針對上述土壤簡化分層，除了利用鑽探資料計算其平均值及標準差之外，亦利用統計方法找出符合其資料變動性之分佈，分別對於簡化第一層以及第二層進行探討，其中由於簡化第一層主要為砂性土壤，因此其塑性指數試驗資料較少，改以直方圖表示各塑性指數範圍中之次數，同樣道理，由於簡化第二層大多為黏土或粉土層，因此其細粒料含量較為一致，亦以直方圖方式表示。

就簡化第一層而言，分別就其孔隙比，細粒料含量、含水量、土壤乾單位重、總單位重、標準貫入試驗值之變化繪製其發生頻率與分佈範圍關係圖，由圖 3-1-7(a)到(g)可以看出，其分佈大多屬於對數常態分佈或是常態分佈，而由於對數常態分佈較能反應其眾數(mode)之數值，因此，對於本研究所使用之參數而言，若需考量其變化情形，則建議使用對數常態分佈來描述其分佈情形。此外，對於簡化第一層土壤而言，標準貫入試驗值亦用來推估其對應之可能摩擦角及彈性模數，如同前述，砂土層之摩擦角(ψ)與彈性模數(E)可利用下列之經驗公式推估其值，其中 $\sigma_{v0'}$ 為垂直有效應力，N 為對應之標準試驗貫入值，經計算分析後，亦可繪製其分佈圖如圖 3-1-6(a)及(b)所示：

$$\tan\phi \approx \left[\frac{N}{(12.2+20.3\frac{\sigma_{v0}'}{p_a})}\right]^{0.34} \qquad (3\text{-}1\text{-}1)$$

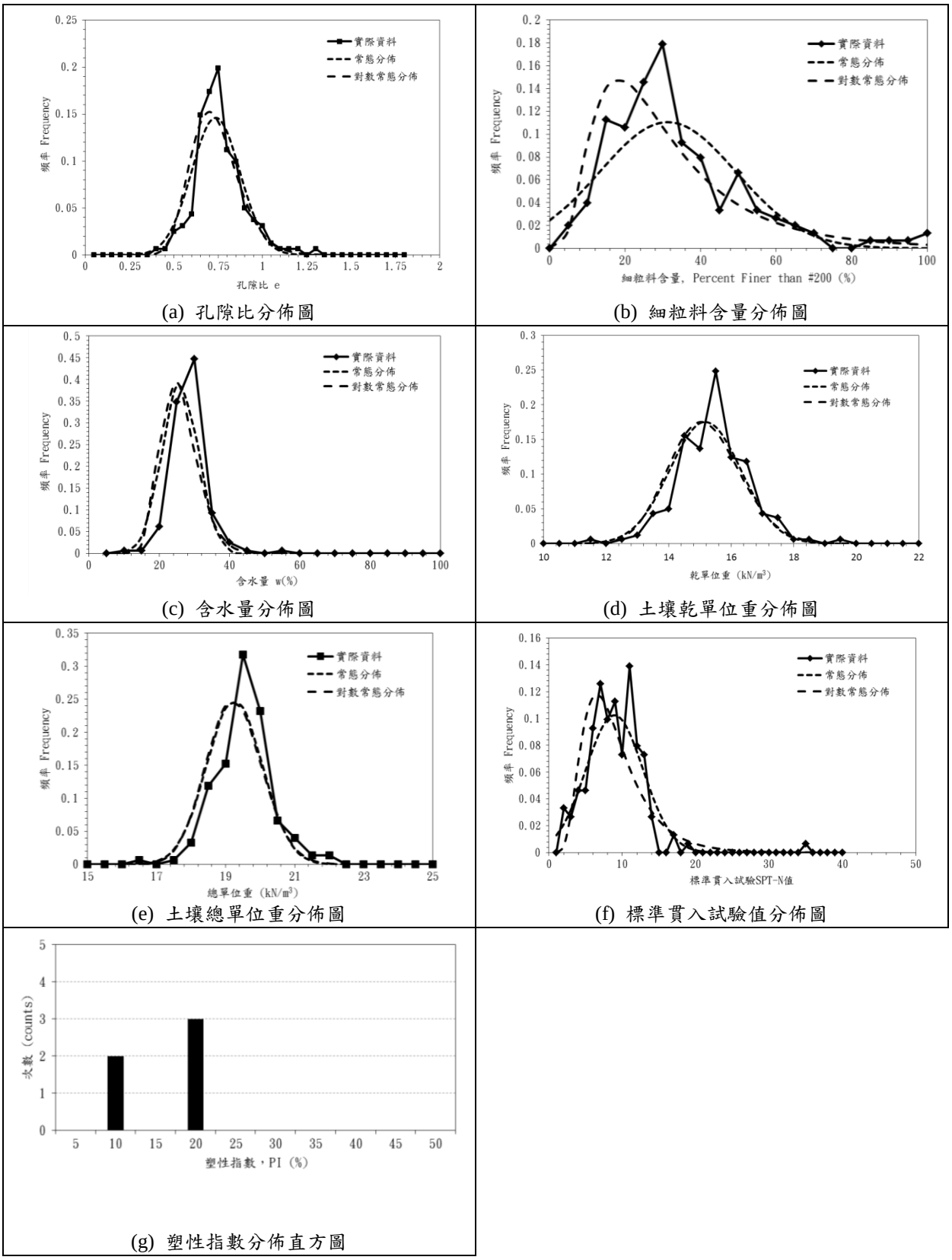
$$E = 920(N)^{0.66}\ (\text{kPa}) \qquad (3\text{-}1\text{-}2)$$



(a) 推估摩擦角之分佈圖　　(b) 推估彈性模數之分佈圖

圖 3-1-6 簡化土層第一層推估力學參數分佈圖

由圖 3-1-6(a)可以看出，摩擦角之分佈在 35 度附近之發生頻率較高，若以對數常態分佈或常態分佈來描述，則其眾數對應之摩擦角約位於 33 度附近，與實際資料較為不符，但若考量其整體分佈情形，則可以看出此兩種分佈函數均能完整地描述其分佈範圍位於 23 度至 40 度之間，因此，就往後分析所需，將使用對數常態分佈來考慮其參數之變異性。其次，就彈性模數的分佈情形來說(圖 3-1-6(b))，對數常態分佈與常態分佈均能描述其眾數發生值以及變化範圍，因此，就分析而言，亦考慮使用對數常態分佈來描述其變化情形。就簡化第一層而言，建議之土壤參數(如表 3-1-2 所示)，包括摩擦角及彈性模數等，均是依照其於對數常態分佈下之平均值而得。



(a) 孔隙比分佈圖　(b) 細粒料含量分佈圖

(c) 含水量分佈圖　(d) 土壤乾單位重分佈圖

(e) 土壤總單位重分佈圖　(f) 標準貫入試驗值分佈圖

(g) 塑性指數分佈直方圖

圖 3-1-7 簡化土層第一層之物理性質及力學性質分佈頻率圖

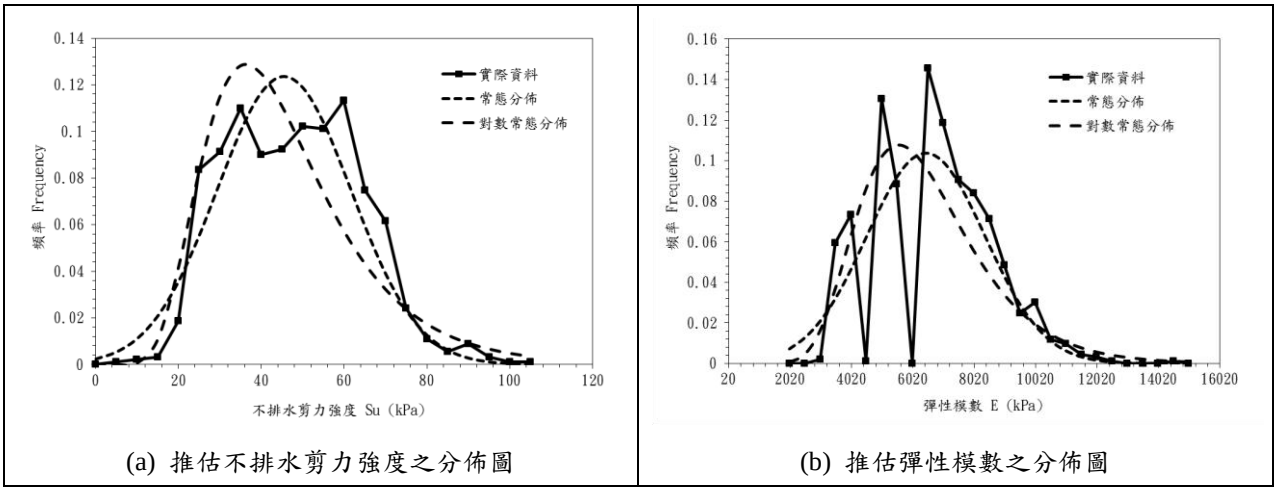
對於簡化土層第二層而言，本研究亦就其孔隙比、塑性指數、含水量、土壤總單位重、乾單位重、標準貫入試驗值等進行統計分析以了解其分佈情形，如圖 3-1-9(a)到(g)所示。如同簡化土層第一層之分佈情形，此地層之土壤一般物性參數亦得以用對數常態分佈得到不錯之模擬分佈，但塑性指數之實際分佈資料若以對數常態或常態分佈模擬則有較大之不同，由於塑性指數在簡化第二層主要用於推估其不排水剪力強度之分佈情形，因此，此一物性之分佈在分析上較不考慮使用，對於本研究之分析影響較小，後續將再利用其他分佈來擬合出較能描述塑性指數分佈之函數。如同簡化土層第一層，模型分析所需使用之力學參數亦需仰賴經驗公式以及實驗資料推估而得，而由於簡化土層第二層主要為黏土或粉土層，因此，模型分析上需要輸入其不排水剪力強度以及彈性模數等參數，並在考慮其變化情形下模型分析結果之變動範圍，才能完整討論土層力學參數變化下，對於近地表變形之影響。

如同前一章所述，推估土壤之不排水剪力強度(Su)以及彈性模數(E)可利用其與塑性指數、有效應力或是標準貫入試驗 N 值之經驗公式來計算，相關公式如下所示，其中 Su 之單位與使用於同一經驗公式內之 σ_p'相同，σ_p'為土壤之預壓密應力，由於此一地層土壤位於地表下 10 公尺處以下，照經驗判斷較屬於正常壓密黏土，因此，此 σ_p'亦可使用垂直有效應力代替，另外，N 為標準貫入試驗值。

$$S_u = (0.11 + 0.0037 \cdot PI) \cdot \sigma_p' \qquad (3\text{-}1\text{-}3)$$

$$E = 1955(N)^{0.63}\ (\text{kPa}) \qquad (3\text{-}1\text{-}4)$$

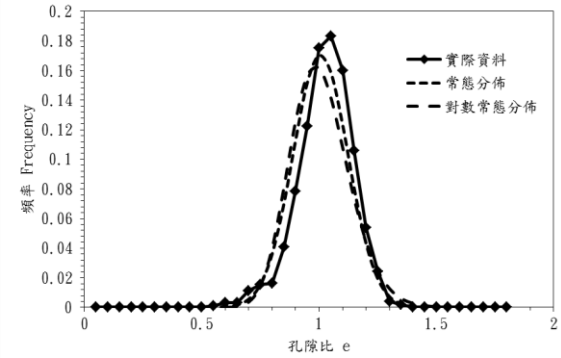
若以現有資料搭配上述之經驗公式，則所求得之不排水剪力強度以及其彈性模數之分佈可以圖 3-1-8 表示：



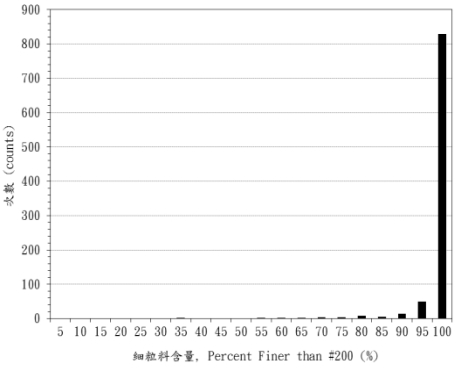
(a) 推估不排水剪力強度之分佈圖　　(b) 推估彈性模數之分佈圖

圖 3-1-8 簡化土層第二層推估力學參數分佈圖

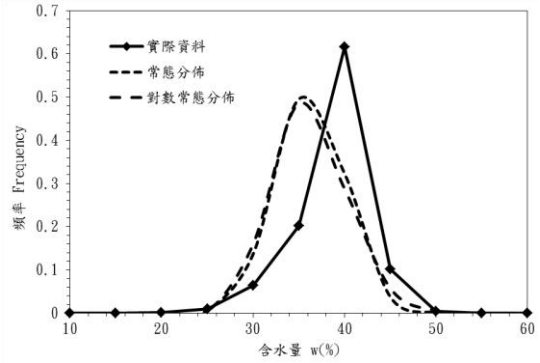
由圖 3-1-8(a)可以看出，推估不排水剪力強度之分佈較偏向常態分佈函數，而彈性模數之分佈(圖 3-1-8(b))不論以對數常態或是常態分佈函數，均無法有效地描述實際資料中某些資料點缺乏之事實，此一現象之可能原因在於簡化土層第二層之標準貫入試驗值之資料點數較少所致，因此，就此一地層之彈性模數分佈狀況來說，亦建議使用對數常態分佈來描述其變化情形。



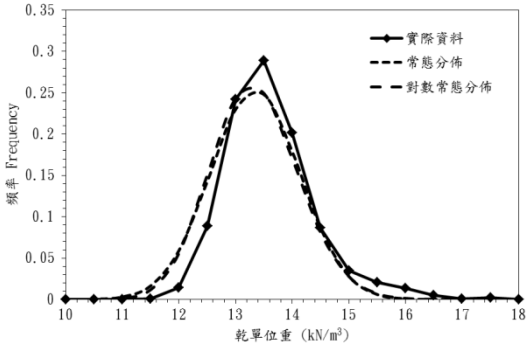
(a) 孔隙比分佈圖



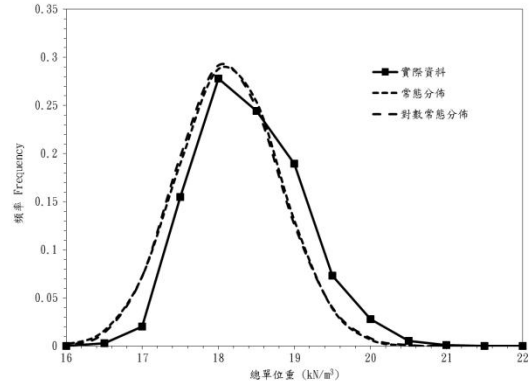
(b) 細粒料含量直方圖



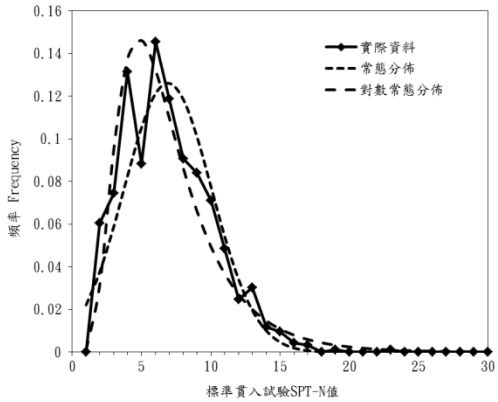
(c) 含水量分佈圖



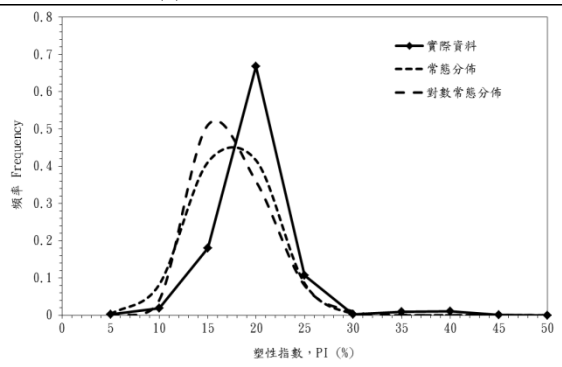
(d) 土壤乾單位重分佈圖



(e) 土壤總單位重分佈圖



(f) 標準貫入試驗值分佈圖



(g) 塑性指數分佈圖

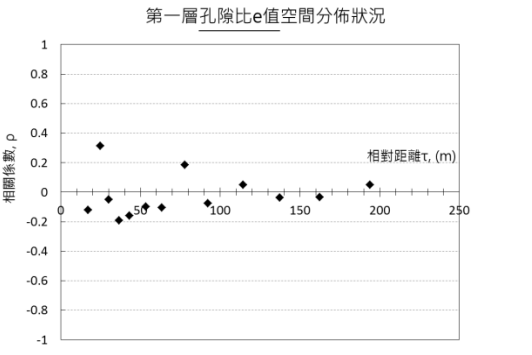
圖 3-1-9 簡化土層第二層之物理性質及力學性質分佈頻率圖

綜合上述，對於山腳斷層靠近台北市仙渡超高壓變電所之簡化地層各項物性及力學參數分佈情形，謹以表 3-1-5 做一綜合整理，須注意的是，此處所討論之資料乃由山腳斷層沿線局部區域之鑽探資料整理而得，若有其他區域有模擬分析之需要，本研究亦需先取得當地資料，並利用此節所使用之方法進行探討，才能使用相對應之資料進行分析。

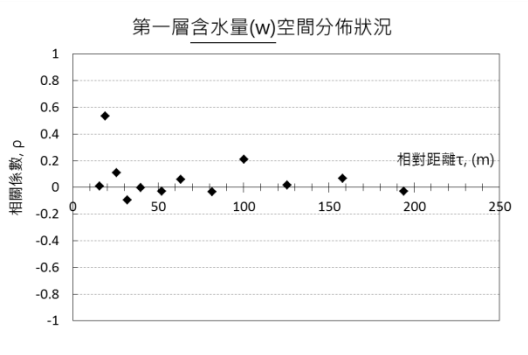
表 3-1-5 土壤一般物性及力學性質之分佈特性

簡化分層	分析可用參數	分佈函數	備註
第一層	孔隙比、含水量、土壤總單位重、乾單位重、標準貫入試驗值	對數常態分佈	
	細粒料含量 摩擦角(推估值)、彈性模數(推估值)	常態分佈	摩擦角之常態分佈函數需再探討其適合之函數
第二層	孔隙比、含水量、土壤總單位重、乾單位重、標準貫入試驗值 彈性模數(推估值)	對數常態分佈	
	塑性指數 不排水剪力強度(推估值)	常態分佈	塑性指數之常態分佈函數需再探討其適合之函數
第三層	孔隙比、含水量、乾單位重、標準貫入試驗 不排水剪力強度、彈性模數(推估值)	對數常態分佈	
	總單位重、塑性指數	常態分佈	

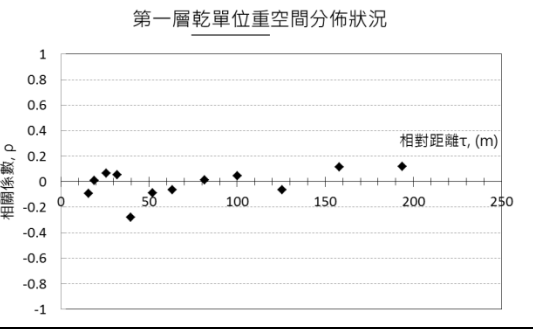
而就上述簡化土層第一層土壤參數之空間分佈變異性而言，均可發現對於如孔隙比或是含水量等一般物性參數(圖 3-1-10 (a)、(b))，其相關性會隨距離增加而下降，但是資料點間單位重之相關性卻與距離沒有太大關係，如圖 3-1-10(c)所示。另外，由圖 3-1-10(d)可以看出，標準貫入試驗 SPT-N 值亦隨距離增加而相關性減少。另外，簡化土層第二層由先前討論可以得知主要材料為粉土質黏土，由圖 3-1-11 之各項參數亦可看出除了細粒料含量外，其餘參數之自相關性皆隨距離增加而減少。另外必須注意是，上述各項空間變異分析部分，假設空間上之變異性是等向性(isotropic)的，即資料點在各方向的變異性均相同。



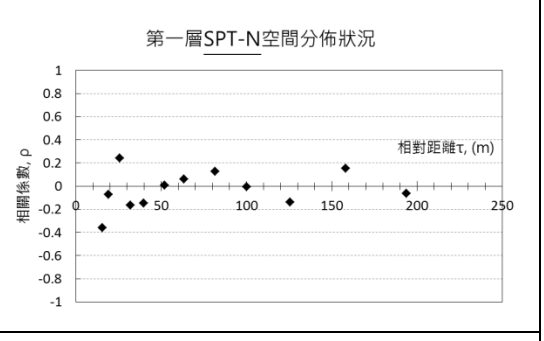
(a) 簡化第一層孔隙比空間分佈特性



(b) 簡化第一層含水量空間分佈特性

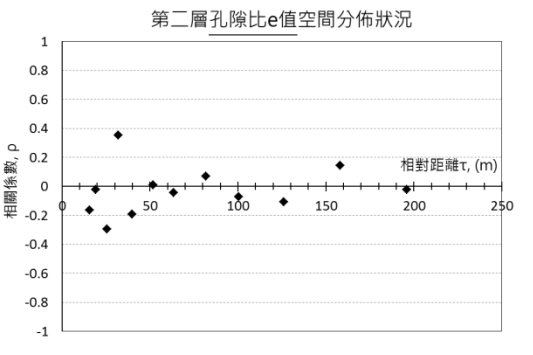


(c) 簡化第一層乾單位重空間分佈特性

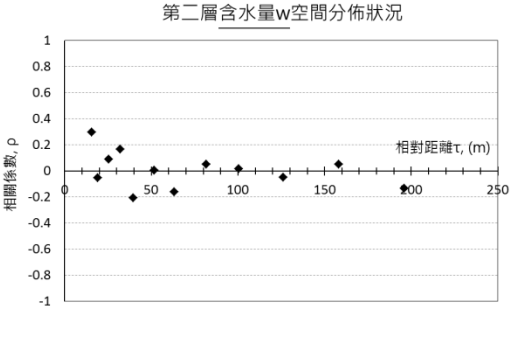


(d) 簡化第一層 SPT-N 空間分佈特性

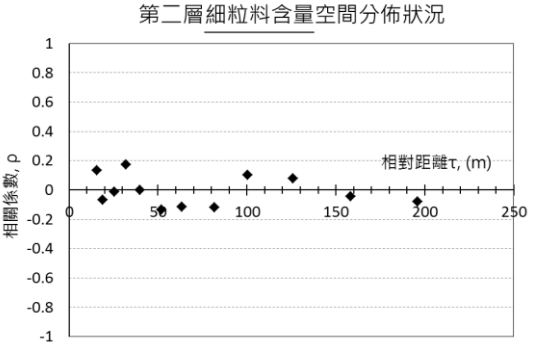
圖 3-1-10 簡化土層第一層各項參數空間分佈特性



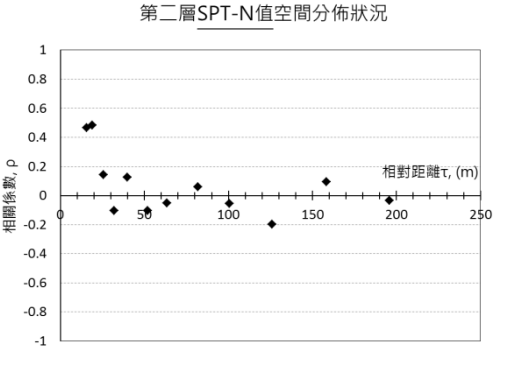
(a) 簡化第二層孔隙比空間分佈特性



(b) 簡化第二層含水量空間分佈特性



(c) 簡化第二層細料含量空間分佈特性



(d) 簡化第二層 SPT-N 空間分佈特性

圖 3-1-11 簡化土層第二層各項參數空間分佈特性

3.1.3. Shionohira Fault

對 Shionohira 斷層的調查在 Hamadori 地震之前由於地表變形速率太低(松田，1975)，多所忽略，然而 Hamadori 地震所引致其沿線的地表變形破壞，特別是其正斷層作用機制，引起日本研究人員的注意，因此陸續在其沿線的幾個位置進行槽溝開挖，底下為兩處開挖槽溝中垂直剖面的記述及以還原剖面解釋該斷層的活動事件。

i. 塩ノ平槽溝

此槽溝位在 Shionohira 斷層南段的極北端處，見圖 2-1-8。場址位在沖積平原上，開挖深度約 2 公尺，長約 11 公尺，約垂直跨過同震引致的地形崖，崖高約 1.2 公尺，見圖 3-1-12(a)。圖 3-1-12(b)為南牆的垂直剖面，於崖坡的下方從槽溝的底部可察看單一近垂直的斷層，往上沿伸呈離地表 80 公分處，分岔成數支呈放射狀。槽溝中的岩層由下到上分別為第 III 層的古第三紀礫石，其上覆不整合接觸的第四紀到全新世的河相土層第 II 層及第 I 層，主要的組成為粗砂及礫石，最上層則為耕作土主要的組成為砂質粉砂(sandy silts)。從岩性的組成及斷層的破裂形式而言論，此錯動的變形在較堅硬的第 III 層中集中在極窄的範圍，而在相較弱的 I 層及耕作土中變形範圍則呈現向上變寬。有趣的是若以 III 層的頂部為標示層則相對的垂直落差約為 1.8 公尺，遠較此次的垂直抬升量多的一半，這還不包括抬升側 III 層頂部被侵蝕消失的量，圖 3-1-12(c)為還原剖面更可清楚的看出此槽溝中的岩土層紀錄的至少兩次的斷層錯動事件，至於在 Hamadori 地震前的錯動事件時間，因無連續的沉積物及定年的資料，無法確定。

A.槽溝的開挖現場



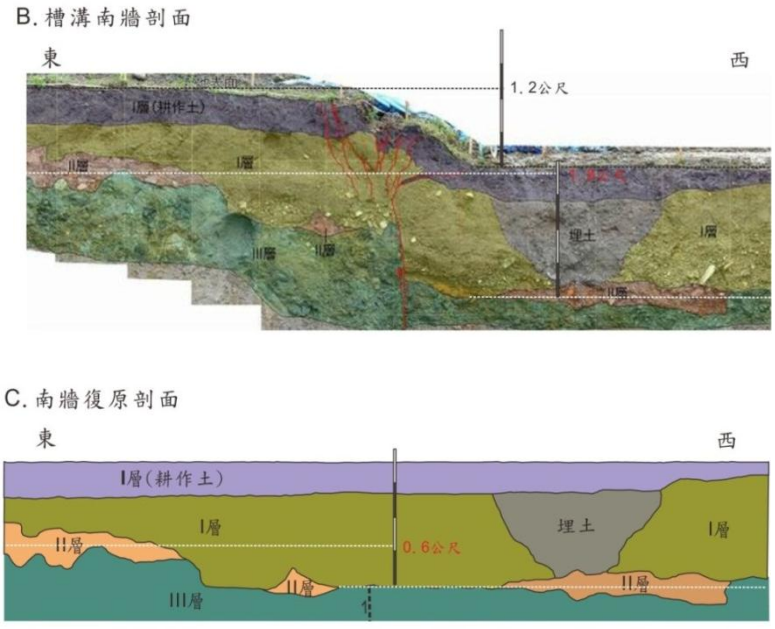


圖 3-1-12 塩ノ平槽溝。位置點見圖 2-1-8(a) 槽溝的開挖現場；
（b）槽溝南牆；（c）南牆 2011 地震的復原剖面。(圖 a 及 b 修改自日本 ERI)

ii. 齊道槽溝

此槽溝位在 Shionohira 斷層北段的南端處，見圖 2-1-8。詳細的場址附近地形見圖 2-1-14 右上方間隔 1 公尺的等高線地形圖，圖上地點 A 即為場址。開挖深度約 3 公尺，長約 4 公尺，約垂直跨過同震引致的斷層崖，崖高約 1.3 公尺，見圖 3-1-13(a)。圖 3-1-13(b)為北牆的垂直剖面，剖面上的岩土層可分成 5 個單元(unites)。從底部到頂部分別為第 5 單元的基盤岩(花崗岩質的礫岩)、第 4 單元為河道充填礫石層、第 3 單元為崩積堆積物、第 2 單元為耕作土及第 1 單元的斷層崖坡下方的崩積土，主斷層於基盤岩位態為走向北西 14 度向西傾斜 70 度，同時可見數道高角度西傾的剪切帶，於基盤岩上覆的單元中斷層的變形帶向上變寬呈倒三角形。圖 3-1-13(c)為丸山正等人(2012)的還原剖面，可見還原回地震前的可能情況後第 5 單元的基盤岩的頂部仍有 0.5 公尺的高程差，可推測此剖面至少記錄兩次地震事件（含 2011 地震）。圖 3-1-14 為本研究重繪的還原剖面，根據地表面及單元 2b 底部的高程差，同震所造成的垂直錯移量推估約 1.35～1.5 公尺（見圖 A），圖 B 為將 2011 地震事件錯動復原的剖面，如同丸山正等人(2012)的還原剖面一般，第 5 單元的基盤岩的頂部的高程差明顯(約 0.35 公尺)，推知另一次地震事件的存在。若大膽地假定單元 3 的延續性在這小距離內為佳，則另一次地震事件存在的可能性變高。由從單元 3 所取的樣本定年的結果及還原剖面的推論結果，可知西元 1410-1030 年後至今當地可能發生兩次(肯定)或三次(?)的地震正斷層作用。至於最後僅兩次事件見於塩ノ平槽溝的原因，可能為(i) 此剖面並沒有最後第三地震事件的紀錄證據；(ii) 塩ノ平槽溝的沉積層因侵蝕作用的缺失，無法紀錄到三次地震事件；(iii) 該地震斷層作用僅發生在 Shionohira 斷層北斷。但因兩槽溝的地理位置鄰近，雖斷層在此區分段，原因(iii)的可能性較低。然而，不管如何，Shionohira 斷層在一千年內錯動兩次的證據充分，其活動性的評估將須大作調整。

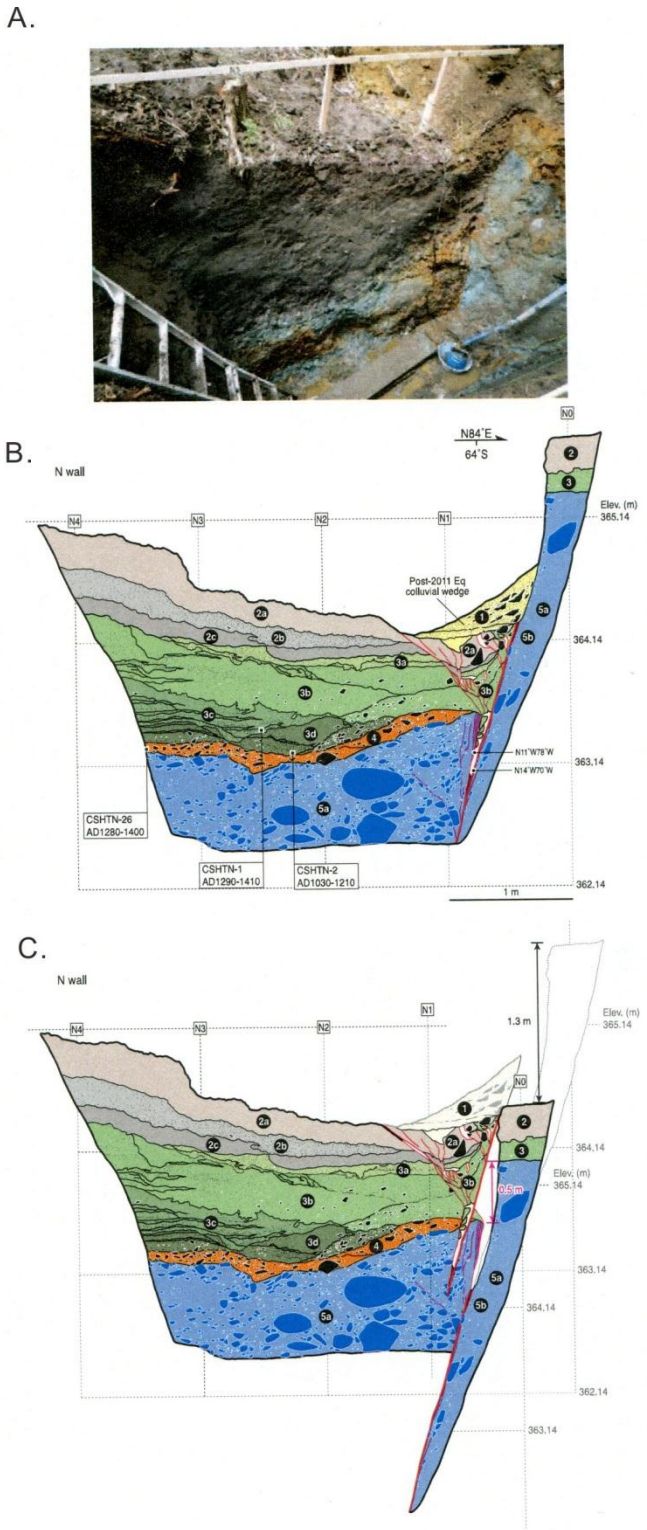


圖 3-1-13 齊道槽溝。位置點見圖 2-1-3。(a)槽溝的開挖現場（b）槽溝北牆（c）北牆 2011 地震的復原剖面。(圖資摘錄自丸山正等，2012)

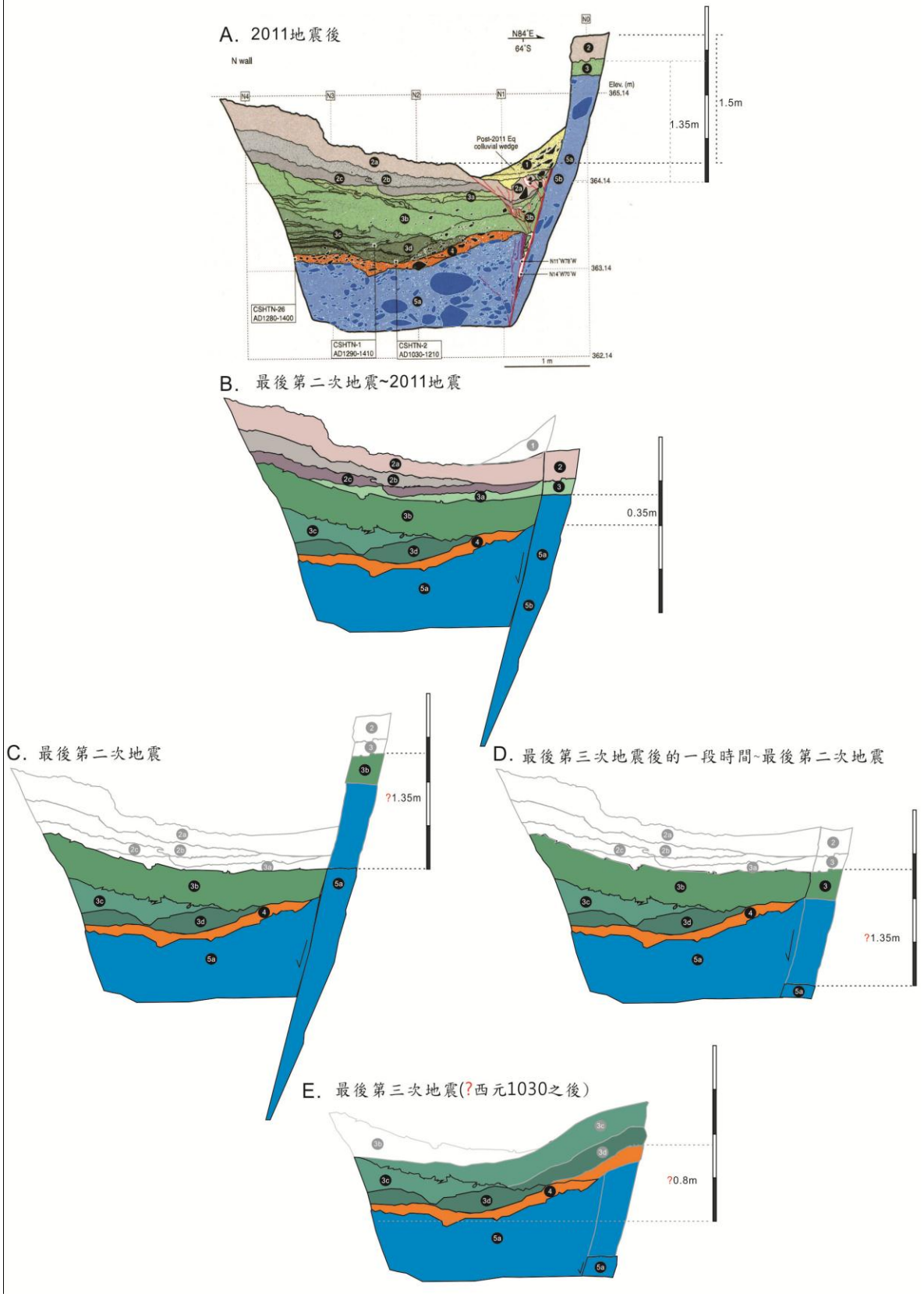


圖 3-1-14 齊道槽溝復原剖面系列。(圖A摘錄自丸山正等，2012)

3.1.4. 國內外禁限建法規整理

由文獻蒐集可知，斷層上覆土層易影響斷層於地表之特徵，當斷層作用時破裂尖端向上擴展，隨基盤錯移比例增加而擴展至地表。由其擴展路徑形成為斷層面，而產生多條斷層面之現象。且鍾春富(2007)、蔣佳興(2006)研究顯示，在有厚層土層覆蓋地區，斷層作用所產生的變形，並非完全集中於斷層面上。由於受到上覆土層影響，將其應變分散至斷層沿線某種寬度應變帶上，從斷層作用對結構物的破壞威力及土地可利用面積廣闊的國家而言，此措施應該是合理的對策。但對處於活動地體構造環境的國家，線形結構物如橋樑、維生管線及隧道等，很難避免跨越活動斷層。因此斷層作用對上覆土層之變形行為及對鄰近結構物之影響，遂成重要之課題，故蒐集以下各國對活動斷層之斷層帶管制法規，探討法規合宜性。

i. 美國加州

美國加州於 1972 年制定法規，規範限制在斷層帶(fault zone)沿線的開發行為(Lazarte et al., 1994)，房子、醫院及學校，絕對禁止蓋在活動斷層帶內。但由目前研究顯示，在有厚層土層覆蓋地區，斷層作用所產生的變形，並非完全集中於斷層面上。由於受到上覆土層影響，將其應變分散至斷層沿線某種寬度應變帶上 (Bonilla, 1982; Backblom and Munier, 2002; Bray, 2001; Bray and Kelson, 2006; Kelson et al., 2001; Konagai, 2001, 2003, 2005; Sherard et al., 1974; Wang et al., 2001)。

活動斷層帶退縮規定(fault setback requirements)，比較表如表 3-1-6，其要點如下：(1)確信斷層線兩旁各 15 公尺禁止建立建築。確信斷層線為有地形、與地質之活動證據顯示及由地下地質調查所確定者。(2)確信斷層線兩旁從 15 公尺至 38 公尺間之條帶內只能建立獨戶、單層木屋或相似之防震結構物。(3)推論斷層線兩旁各 30 公尺禁止建立建築。推論斷層為只有少數幾點之活動證據顯示及粗略之地下地質調查。(4)推論斷層線兩旁從 30 公尺至 53 三公尺間之條帶內只能建立獨戶、單獨木屋或相似之防震結構物。(節錄自孫思優等，1999)

ii. 紐西蘭

紐西蘭位於兩個聚合性板塊交界，受斷層與地震影響明顯，在 1991 年的建築法與資源管理法規內皆有提到，目前沒有技術可以防止跨斷層之建物遭受損害，當局僅有細分土地使用責任，卻少有地震災害等因應計畫，以建立鄰近斷層建築建議之準則，提供政府在有鄰近活斷層的土地使用規劃方法之方向協助政府、社區或個人減少災害風險，並加速恢復時間僅避免和減輕活動斷層破裂所產生的風險，未包含強地動、土壤液化、隆起、陷落、山崩和海嘯災害，建議斷層兩側 20 公尺內需加強調查與必要的工程防護措施如表 3-1-6。

iii. 日本

在日本及大陸，地狹人稠、斷層遍佈，但幾乎沒有禁、限建之規範(蕭謙麗等人，2000)，僅針對重大公共工程，如核能電廠、水庫、加油站、醫院等嚴格限制；一般住屋未予限制。日本阪神地震後不劃設禁建之理由，據神戶大學都市安全及救災研究中心(RCUSS)Okimura 教授所述：斷層高差不大，2～3m；逆衝斷層出露在鬆軟之厚層土壤上，下次破壞位置多不在同一位置；再現空間分佈不可預測，而又在人口密集區，故劃設禁限建區社會成本太大，有善盡告知民眾地震災害危險之配套措施，而在三浦半島的北武島斷層經調查確定位置後，僅限定兩側 25 公尺內不建築，比較表如表 3-1-6。

iv. 中國

對於斷層兩旁建築物尚無管制，依地質構造，地震歷史，地層穩定性如地震時發生山崩、沈陷、地裂、土壤液化等以都市計畫使用分區手段劃入非建築使用區，對於地震斷層引起災害預防以都市及重大公共工程為重心，則規定必須距斷層 5 公里。藉土地利用規劃達到禁限建之目的，在高烈震區之大都市從地質、地形、地貌、地質構造、土層在地震時之穩定性條件擬定細部計畫。地震區中地形坡度 250 以上劃為綠化地區，100~250 土地補強後作有限度使用。穿越都市或在附近之斷層，根據斷層帶寬度、活動性、深度、決定距斷層之距離，比較表如表 3-1-6。

v. 台灣

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，蘇瑛敏(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)三十公尺、東側(上盤)五十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五十公尺範圍之內的帶狀地區(蘇瑛敏，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 3-1-7(蘇瑛敏，2003)，比較表如表 3-1-6。唯斷層引致地表破裂並非單一線形，且各國斷層類型、活動型態、上覆土層特性等皆不相同，亦會影響地表變形，進而對地表建物或地下維生管線造成影響，故各國法令應考慮其立法目的及著重於開發前之調查工作。

表3-1-6 美國、紐西蘭、日本、中國大陸及台灣活動斷層帶管制比較表(改自盛仲達，2008)

	美國	紐西蘭	日本	中國大陸	台灣
活動斷層帶建築物之管制或方法	1971.Sam Fermamdo地震1972年制定「阿奎斯特一布里奧洛特別調查區段法案(Alguist-priolo Erthquake Fault zoning.ACT)經十次修正1994改稱「阿奎斯特一布里奧洛地震斷層區段劃定法安案」(即加州地震斷層法)	建築法 Building Act 1991(BA) 和資源管理法 Resource Management Act 1991 (RMA)	災害對策基本法 災害救助法 建築基準法 大規模地震對策特別措置法 促進建築物耐震修改法律、受災市街地復興特別措置法建築法(第八十四條政府得於災區發佈禁限建令	1.對於斷層兩旁建築物尚無管制， 2.依地質構造，地震歷史。地層穩定性如地震時發生山崩、沈陷、地裂、土壤液化等以都市計畫使用分區手段劃入非建築使用區	1.開發管制：山開辦法第五條第一款坡度陡峭者。第二款地質結構不良，地層破碎、活動斷層或順向坡有滑動之虞者不得開發。 2.禁建：分暫時性禁建及永久性禁建。「禁建」不得建築之意，「限建」為可建築，但規定其限制建築之規模、大小、或高度等、「暫時性禁建」，表示在一段時日內實施禁建「永久性禁建」即表示永久性實施禁建。 3.九二一大地震後，內政部88.11.8台八八內營字第八八七七八五四號函送車籠埔斷層線兩側各50M範圍實施暫時禁建，至88.12.31止。 4.88.12.31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」規定該斷層兩側各十五公尺都市計畫內土地為禁限建範圍、不明確地區的西側(下盤)三十公尺、東側(上盤)五十公尺範圍為永久禁限建地區。
立法目的	(1)阻止在活動斷層上建造房屋防止錯動造成災害，但未包括土壤液化、山崩、土石流， (2)改進現有建築物耐震能力 (3)管制斷層兩側200m以內開發案 (4)一九八九年洛馬普利塔地震(Loma Prieta. Earthquake)復制定地震危害區劃分法	提供政府在有鄰近活斷層的土地使用規劃方法之方向 協助政府、社區或個人減少災害風險，並加速恢復時間 僅避免和減輕活動斷層破裂所產	日本針對活動斷層禁限建僅針對重大公共工程，如核電廠、新幹線等，一般建物雖於建築法(84條)明訂，但很少	大陸對於地震斷層引起災害預防以都市及重大公共工程為重心，規定必須距斷層五公里	1.斷層帶管制之目的在運用環境風險管理策略以降低地震災害之損失，即是利用地質及都市計畫手段，將地震可能導致損失降低。 2.提高建築物之耐震能力：修改建築技術規則將台灣劃分為一甲區(特別強震區，如花蓮、嘉義、白河、古坑等)、地震一乙區(強震區，如東

	美國			紐西蘭	日本	中國大陸	台灣
	案將土壤液化、山崩、土石流加以規範。			生的風險，未包含強地動、土壤液化、隆起、陷落、山崩和海嘯災害	使用。		勢、石岡、豐原)、地震二區(中震區，台中市、新社、太平、大里、草屯、竹山、集集、埔里等)及地震三區(弱震區)，並將地震力計算增加垂直地震加土壤液化及動力分析。
開發前調查工作	加州政府礦務暨地質委員會於一九九四年頒佈「評鑑地表斷層錯動危險性準則；規定地震斷層之劃定公佈分兩階段。第一階段由州地質師發佈「初步評審地圖」供民眾公開閱覽九十天，經評審，修正繪製「正式地圖」分送州及縣市政府。			1.確認斷層位置 2.建立迴避區域 3.確認斷層破裂災害風險 4.評估及分析風險 5.降低風險 6.監控與審查	僅對重大公共工程、核能電廠、學校限制。	注重開發前地震危險分析災害分析	1.開發前調查項目主要為(1)物化環境(2)生態環境(3)景觀美質(4)社經環境 2.斷層帶盜線之評估為錯動位移、形態、位態長寬、斷層上下盤之材料性質、斷層上方覆土層厚度及類別、性質、斷層長度、活動週期、歷史上最大地震之破壞情形統計調查
地震法規對活動斷層兩旁建築物之管制。	斷層位置	規定範圍	限制內容	斷層兩側 20 公尺內需加強調查與必要的工程防護措施	一九九五年阪神大地震後在三浦半島的北武島斷層經調查確定位置後，限定兩側 25 公尺內不建築。	1.藉土地利用規劃達到禁限建之目的，在高烈震區之大都市從地質、地形、地貌、地質構造、土層在地震時之穩定性條件擬定細部計畫。 2.地震區中地形坡度 250 以上劃為綠化地區，100~250 土地補強後作有限度使用。 3.穿越都市或在附近之斷層，根據斷層帶寬度、活動性、深度、決定距斷層之距離。	建築技術規則第十三章山坡地專章第 262 條第三款活動斷層：依歷史上最大地震規模(M)劃定在下表範圍者： 歷史地震規模： 1. m≧7 2. 7>m≧6 3.m≦6 或無記錄者 不得開發範圍： 1.斷層帶二外側邊各 100M 2.斷層帶二外側邊各 50M 3.斷層帶二外側邊各 30M
	確信斷層線	兩旁各 15 公尺以內	禁止興建住屋				
	推論斷層線	自 15 至 38 公尺間之條帶	僅可興建獨戶、單層木屋或相似之防震結構物				
		兩旁各 30 公尺以內	禁止興建住屋				
		兩旁自 30 至 53 公尺間之條帶內	僅可興建獨戶、單層木屋或相似之防震結構物				

表 3-1-7 我國有關活動斷層之土地管理法規整理(蘇瑛敏，2003)

<table>
<tr><th>法規名稱</th><th>條文內容</th><th>說明</th><th>最新修正日期</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，如無確保安全對防護設施者，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><td>100.1.5</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><td>95.6.14</td></tr>
<tr><td>山坡地建築管理辦法</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><td>92.3.26</td></tr>
<tr><td>建築技術規則施工篇</td><td>第 13 章(山坡地建築)及第 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><td>歷史地震規模</td><td>不得開發建築範圍</td></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><td>101.11.30</td></tr>
<tr><td rowspan="2">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…」</td><td rowspan="2">規定活動斷層一定範圍不得開發(海埔地)</td><td rowspan="2">101.8.30</td></tr>
<tr><td>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)活動斷層五百尺之範圍。」</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><td>88.10.5</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，但最大基層建築物面積不得超過 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><td>88.12.24</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><td>100.11.9</td></tr>
</table>

3.1.5. 前期之車籠埔斷層後續精進

先前針對車籠埔斷層沿線之竹山槽溝以及其所在位置之工程鑽探資料進行分析，並提出簡化土層之建議以利本研究之模型分析。對於本計畫而言，亦另行規畫補充鑽探點，以取得車籠埔斷層位於其他位置之土層資料。有關於補充鑽探位置如圖 3-1-15 所示，共二個工程鑽孔，且位於豐原中正公園以及中正公園西南側約 400 公尺處。



圖 3-1-15 車籠埔斷層補充鑽探點位置(其中主斷層線與背衝斷層最短距離約為 300 公尺)

就中正公園鑽孔而言，其所在位置位於車籠埔主斷層於中正公園附近之背衝斷層上盤處，此一鑽孔之鑽探報告指出，表層土壤至地表下約 8 公尺處為礫石層，地表下 8 公尺處至約 30 公尺處為砂頁岩互層，並夾雜少許黏土及粉土質，詳細資料請見表 3-1-8 所示，由於本工程鑽孔之土壤樣本不多，因此，針對僅有之岩石樣本及其層間夾泥之力學強度亦請參考表 3-1-8 所示。另外，位於中正公園西南側之鑽孔，位於車籠埔主斷層線之上盤處，鑽探報告指出地表至 2.5 公尺處為人工回填土，地表下 2.5 公尺處為黏土質砂或砂礫質黏土交錯出現，詳細資料請見表 3-1-9 所示，針對此鑽孔取樣所得之土樣，亦進行相關力學試驗，其試驗資料列於表中備註欄。

表 3-1-8 車籠埔斷層位於中正公園附近地層分佈

深度(m)	地層描述	備註
0 ~ 8	棕色礫石層夾砂及少數粉土	
8 ~ 17	砂頁岩互層，層面間偶夾砂及黏土	層間夾泥直剪試驗結果，位於： 地表下 8.6m (C_{res}=23.7kPa,ψ_{res}=30.5°)、 地表下 13.8m(C_{res}=22kPa,ψ_{res}=17°)以及 地表下 17.4m(C_{res}=21.3kPa,ψ_{res}=24°)
17~20	斷層剪裂帶及砂頁岩互層	
20~30	斷層剪裂帶及頁岩偶夾薄層砂岩	

表 3-1-9 車籠埔斷層位於中正公園西南側地層分佈

深度(m)	地層描述	備註
0 ~ 2.5	人工回填土	深度 18.5m 處 (USCS: SM)，進行無圍壓縮試驗所得不排水剪力強度約為 35 kPa； 深度 21 公尺處 (USCS: SM)，進行三軸等向壓密不排水試所得土壤 c=270 kPa, ψ=26°
2.5 ~ 10	黏土質及粉土質砂，夾礫石	
10 ~ 30	粉土質礫石，夾粉土質及黏土層砂	

而由於位於中正公園附近鑽孔所在位置之土壤或岩石試驗資料相對較為缺乏，因此，基於鑽探報告以及現有之試驗資料建議此處地層簡化如表 3-1-10 所示：

表 3-1-10 豐原中正公園鑽孔處簡化土層表

<table>
<tr><td>地層深度
(m)</td><td>描述</td><td>飽和單位重 (kN/m^3)</td><td>SPT-N</td><td>C</td><td>ϕ
(度)</td><td>E
(MPa)</td><td>ν</td></tr>
<tr><td>0 ~ 8
(礫石層)</td><td>棕色礫石層夾砂及少數粉土</td><td>20 (參照試驗資料及推估值)</td><td>33-50</td><td>0</td><td>45</td><td>14-24 MPa
(19) MPa</td><td>0.35</td></tr>
<tr><td colspan="8">ϕ以 SPT-N 推估而得, E 及 ν 參照另一孔資料</td></tr>
<tr><td rowspan="2">8 ~ 17
(互層夾泥)</td><td rowspan="2">砂頁岩互層，層面間偶夾砂及黏土</td><td rowspan="2">22</td><td rowspan="2">(無資料)</td><td>夾泥殘餘強度 21~24 kPa
(21 kPa)</td><td>夾泥殘餘強度 17~30°
(20°)</td><td rowspan="3">7400-18000 MPa
(12700 MPa)</td><td rowspan="2">0.25~0.4</td></tr>
<tr><td colspan="2">C 與ϕ取自補充鑽探之岩石直剪試驗數據</td></tr>
<tr><td>17 ~ 30
(砂頁互層)</td><td>斷層剪裂帶及砂頁岩互層</td><td>24</td><td>(無資料)</td><td>320-1200 MPa
(320 MPa)</td><td>33°</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="8">E, ν, C, ϕ摘錄自 1994 岩盤工程研討會，草嶺崩塌地穩定性分析研究，洪如江、林銘郎 、李錫堤，P.469-478</td></tr>
</table>

基於上述有關於中正公園西南側之土層分佈情形以及試驗結果，建議此處之土層簡化如表 3-1-11 所示，由於該處地層鑽探深度之限制(30 公尺)，因此建議之土層深度僅至補充鑽探孔之最底部。

表 3-1-11 豐原中正公園西南側鑽孔處簡化土層表

<table>
<tr><td>地層深度(m)</td><td>描述</td><td>飽和單位重(kN/m^3)</td><td>SPT-N</td><td>C(kPa)</td><td>ϕ(度)</td><td>E(MPa)</td><td>ν</td></tr>
<tr><td>0 ~ 10</td><td>黏土及粉土質砂，夾礫石</td><td>20.6</td><td>18~50</td><td>10</td><td>35-40</td><td>12~22</td><td>0.3</td></tr>
<tr><td colspan="8">C 及ϕ以 PI 推估而得，E 以 SPT-N 推估而得</td></tr>
<tr><td>10 ~ 30</td><td>粉土質礫石，夾粉土及黏土質砂</td><td>20.6</td><td>50</td><td>270</td><td>26</td><td>14-24</td><td>0.35</td></tr>
<tr><td colspan="8">C 與ϕ取自三軸壓密不排水試驗數據</td></tr>
</table>

3.2. 室內實驗

3.2.1. 離心模型砂土試體正斷層錯動試驗結果與討論

利用掃瞄台車在正斷層砂試體陷落過程中，進行正斷層地表剖面掃瞄，可以有效掌握在不同正斷層垂直錯動量下，地表陷落剖面的變化。本試驗每隔 2.5 mm 的正斷層垂直陷落量，掃瞄地表剖面一次。圖 3-2-1(80gNtest24，Dr=70%)為在 80g 的試驗條件下，正斷層錯動陷落試驗，在不同垂直陷落量下的地表變形剖面曲線。圖中橫座標代表水平距離，而水平距離 0 代表斷層尖端所處初始位置；縱座標則代表地表陷落高度。圖 3-2-2(80gNtest24，Dr=70%)則可以顯示斷層錯動角度及初始位置與地表變形剖面之對應關係。圖中橫座標亦代表水平距離，水平距離 0 處，代表斷層尖端所處初始位置；縱座標則代表地表高程，縱座標 0 代表地表陷落前之高程。圖 3-2-3(40gNtest26，Dr=70%)及圖 3-2-4(40gNtest30，Dr=70%)為在 40g 的試驗條件下，正斷層錯動陷落試驗，在不同垂直陷落量下的地表變形剖面曲線。圖 3-2-5(40gNtest26，Dr=70%)及圖 3-2-6(40gNtest30，Dr=70%)則可以顯示斷層錯動角度及位置與地表變形剖面之對應關係。圖 3-2-7(1gNtest31，Dr=70%)為在 1g 的試驗條件下，正斷層錯動陷落試驗，在不同垂直陷落量下的地表變形剖面曲線。圖 3-2-8(1gNtest31，Dr=70%)則可以顯示斷層錯動角度及位置與地表變形剖面之對應關係。這八個圖顯示隨著正斷層垂直陷落量的增加，正斷層錯動所形成的邊坡高度及邊坡角度逐漸增加，當垂直陷落量約為覆土層厚度的 6.25%時，會形成兩個不同邊坡角的邊坡，近地表(約 2 cm 深)有較陡的邊坡坡角，然後接續一個較緩的邊坡；隨著垂直陷落量繼續增加(邊坡高度繼續增加)，較緩的邊坡逐漸向前崩落及堆積，成為單一較平緩的邊坡，而正斷層出露地表位置，亦逐漸向後延伸，最後形成約 27 度的緩坡。圖 3-2-9 顯示在愈高 g 的試驗條件下進行正斷層試驗，斷層出沒地表的位置愈遠，也形成較緩的邊坡。陷落最深處，大約出現在水平距離 0 處(斷層尖端所處位置)，然後向下降側(上盤)緩升。

圖 3-2-10 至圖 3-2-13 分別為 80gNtest24、40gNtest30、40gNtest26、1gNtest31 砂土試體正斷層試驗，在不同陷落高度時，正規化水平距離與正規化陷落高度之地表剖面圖。圖中顯示下盤正斷層陷落變形範圍約為約為上覆土層厚度的 0.8 倍。在高 g 的試驗時，在較

小的垂直陷落量，有較大的正規化地表陷落量(>1.3)，最大地表陷落量出現在斷層尖端處；隨著垂直陷落量增加，正規化地表陷落量逐漸減少至 1.2；但 1g 的試驗隨著垂直陷落量的增加，而逐漸增加而達到 1.4。地表最大陷落深度較正斷層基盤陷落深度大(正規化地表陷落量大約等於 1.2)，主要原因為當基盤沿著 60 度陷落時，多出如圖 3-2-14 的黃色體積部分，需要由上覆土層來填補，因此導致在斷層尖端處，會有最大的地表陷落量，此地表陷落量會隨著距斷層尖端的距離愈遠而逐漸減少，並趨近於斷層的陷落量(正規化陷落量趨近 1)；此影響範圍約為上覆土層厚度的 0.6 倍。而此範圍的地中應力將急速降低，甚至產生張應力。最大陷落量的大小與上覆土層的剪力強度有關，較高的剪力強度的覆土層，會發生較陡的邊坡，減少邊坡的崩落，因此會有較大的最大地表陷落量。雖然由前面的試驗成果發現，地表變形陷落剖面並不隨著試驗 g 值的不同，而有太大的不同，但圖中顯示在低 g 值的試驗條件下，陷落土層形成的邊坡較陡；在高 g 的試驗條件，陷落土層形成的邊坡較緩。最主要的原因可能是在高 g 情況下，砂土的膨脹角受到高覆土應力的抑制，不容易發展成較陡的邊坡，而有較大的崩落量，因而形成較平緩的邊坡，有較多崩落的砂土堆積於坡腳，也造成有較小的最大陷落量。因此 1g 的試驗(1gNtest31)有較大的斷層陷落量(1.4) 。從理論上推測較平緩的斷層角(小於 60 度的斷層角)，在相同的垂直陷落量時，如圖 3.2.2-14 的黃色體積部分也會較大，因此最大垂直陷落量也會較大，影響範圍也會較廣。另外由於此部分的陷落量，也會同時導致反向斷層的出現，可以預期當斷層角度愈小，反向斷層出現將會愈明顯。

圖 3-2-15、圖 3-2-16 及圖 3-2-17 分別為正斷層錯動陷落試驗，在不同 g 值試驗條件下，垂直陷落動距離(50mm; 25%)的斷層側視剖面。雖然由前面的試驗成果發現，地表變形剖面並不隨著試驗 g 值的不同，而有太大的不同，但圖中顯示在低 g 值的試驗條件，上盤土層有較明顯的陷落及摺皺現象，染色的砂土層也有較大的增厚現象；在高 g 的試驗條件，上述現象受到壓抑，最主要的原因可能是在高 g 情況下，砂土的膨脹角受到較高覆土應力的抑制，不容易發展。

3.2.2. 離心模型黏土試體正斷層及逆斷層錯動試驗結果與討論

利用掃瞄台車在正斷層黏土試體陷落過程中，進行正斷層地表剖面掃瞄，可以有效掌握在不同正斷層垂直錯動量下，地表陷落剖面的變化。本試驗的人工黏土採用含甘油量為40%來拌和朋脫土，利用分層靜壓方式，來準備黏土試體。人工黏土試體厚度約 22cm，單位重為 16.7kN/m3，該人工粘土試體在 40 g 條件下平均十字片剪力強度約為 37kPa，而在 80 g 條件下約為 47 kPa(表 2-3-4)。各組試驗的十字片剪不排水剪力強度隨深度變化情形如圖 3-2-18 所示，圖中顯示除地表層剪力強度較低外，其他深度則相當的均勻，且 40g 及 50g 兩個黏土試體的剪力強度大致相同，而 80g 條件下的兩個黏土試體的剪力強度也大致相同。

圖 3-2-19(40gNtest32-C)、圖 3-2-20(50gNtest36-C) 及圖 3-2-21(80gNtest37-C)為正斷層錯動試驗，在不同垂直陷落量下的地表變位剖面；而圖 3-2-22(40gNtest32-C) 圖 3-2-23(50gNtest36-C) 及圖 3-2-24(80gNtest37-C)則為正斷層錯動試驗，在不同垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度的關係。圖 3-2-25、圖 3-2-26 及圖 3-2-27 為正斷層錯動試驗(40gNtest32-C、50gNtest36-C 及 80gNtest37-C)，不同垂直陷落量下，正規化地表變位剖面與正規化水平距離關係。相較於砂土試體，在目前黏土的剪力強度下，陷落的範圍較為寬廣，約為覆土層厚度的 1.9 倍，但地表剖面的坡度相對於砂土試體的坡度則較為緩和。

圖 3-2-28 為黏土層正斷層錯動試驗，在本試驗最大垂直陷落量下，原型地表變位剖面與原型水平距離關係。圖中顯示隨著覆土層厚度的增加，地表變形範圍也愈為寬廣。另外圖 3-2-29(40gNtest32-C)、圖 3-2-30(50gNtest36-C) 及圖 3-2-31(80gNtest37-C)分別為正斷層錯動試驗，試驗前及試驗後(垂直陷落量=5cm)，地表裂縫及側視圖。圖 3-2-32 為整合 40gNtest32-C 及 80gNtest37-C 兩個試驗的地表裂縫分佈比較圖，圖中顯示在高 g 的試驗條件下，有較多道、較寬及較深的裂縫出現。

圖 3-2-33(50gNtest36-C)顯示在不同垂直錯動量下地表裂縫的發展情形(S0-S20)，大約在垂直陷落量 1%，第一條裂縫開始出現，隨著陷落量的增加，地表裂縫的條數及寬度、深度亦逐漸增加。圖 3-2-34 為正斷層錯動試驗，在不同 g 值下，垂直錯動量(5cm) ，主要地表裂縫的寬度及深度發展情形(S20)。圖 3-2-35 顯示進行正斷層試驗時，黏土試體與砂土

試體最大的不同為黏土試體沿正斷層陷落處，地表會發生大小不同寬度及深度的裂縫，地表剖面的坡度較平緩及陷落的範圍也較為寬廣。試驗的 g 值愈高，裂縫的深度愈深，裂縫的寬度也愈寬。圖 3-2-36 黏土試體正斷層錯動試驗，在不同 g 值下，不同垂直陷落量時，地表角變形之比較，這個圖可以提供結構物基礎破壞評估的參考。

圖 3-2-37 為逆斷層錯動試驗(80gRtest38-C)，在不同垂直頂升量下的地表變位剖面，而圖 3-2-38 為逆斷層錯動試驗，在不同垂直頂升量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度的關係。圖中顯示頂升的範圍較砂土試體的範圍更為寬廣，約為覆土層厚度的 2.2 倍，較正斷層陷落範圍為廣。圖 3-2-39 黏土層逆斷層錯動試驗，在不同頂升量下，地表角變形之比較，隨著逆斷層頂升量的增加，地表角變形逐漸增加。圖 3-2-40 為逆斷層錯動試驗(80gRtest38-C)，試驗前後(垂直陷落量=5cm)，地表裂縫分佈及側視圖。圖 3-2-41 為逆斷層錯動試驗，在垂直錯動量 5cm ，主要地表裂縫的寬度及深度發展情形(S20)，圖中顯示裂縫主要在上盤發展，而且裂縫深度相較於正斷層為淺。圖 3-2-42 砂土試體及黏土試體逆斷層錯動試驗，垂直陷落量=5cm 時，地表變形剖面之比較，雖然影響範圍較為寬廣，但地表剖面的坡度相對於砂土試體的坡度，則較為緩和。

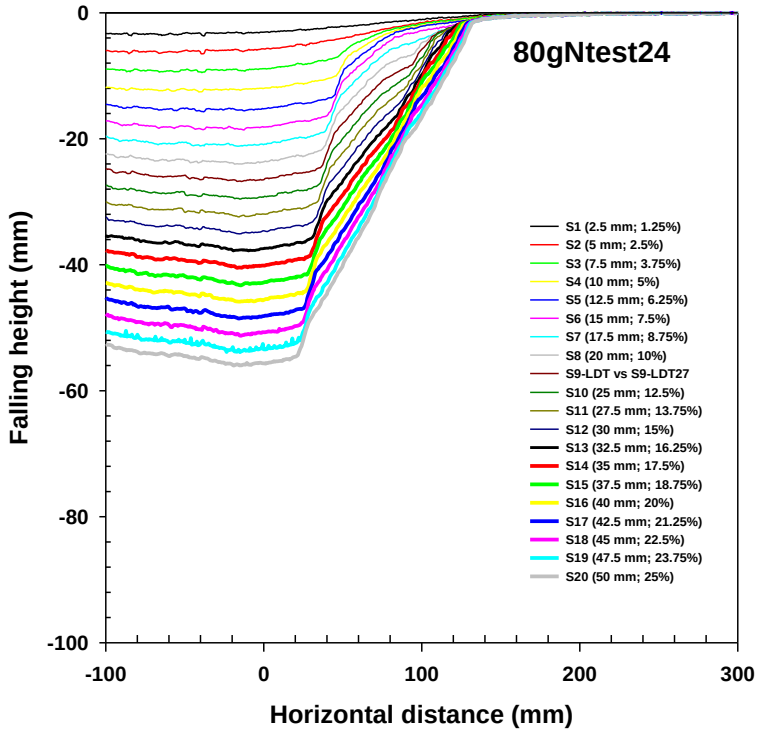


圖 3-2-1 正斷層錯動試驗，在不同垂直陷落量下的地表變位剖面(80gNtest24)

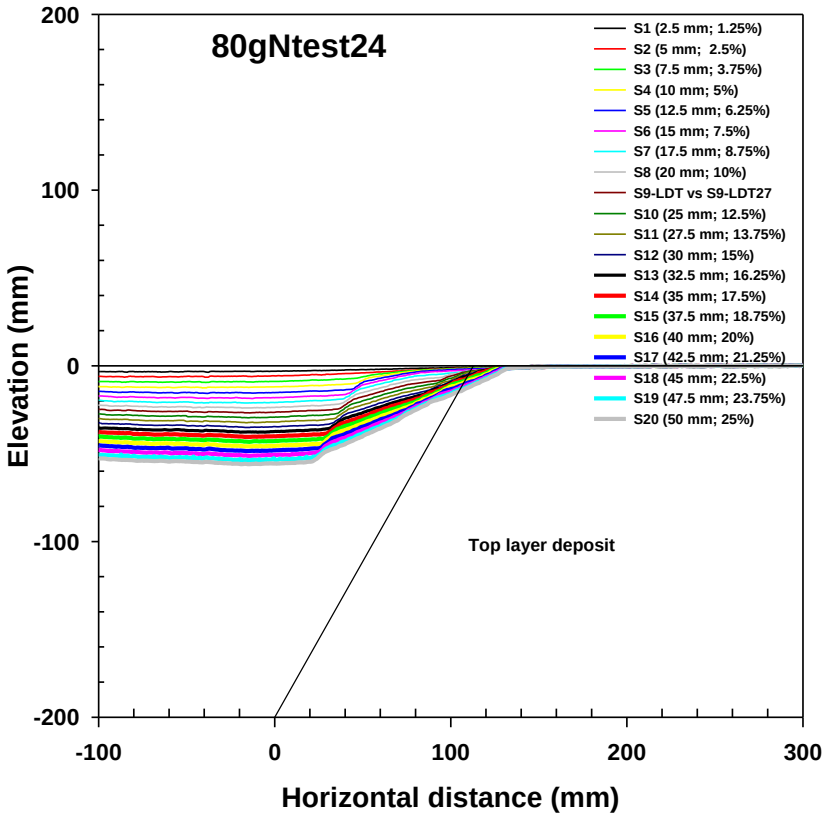


圖 3-2-2 正斷層錯動試驗，在不同垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係(80gNtest24)

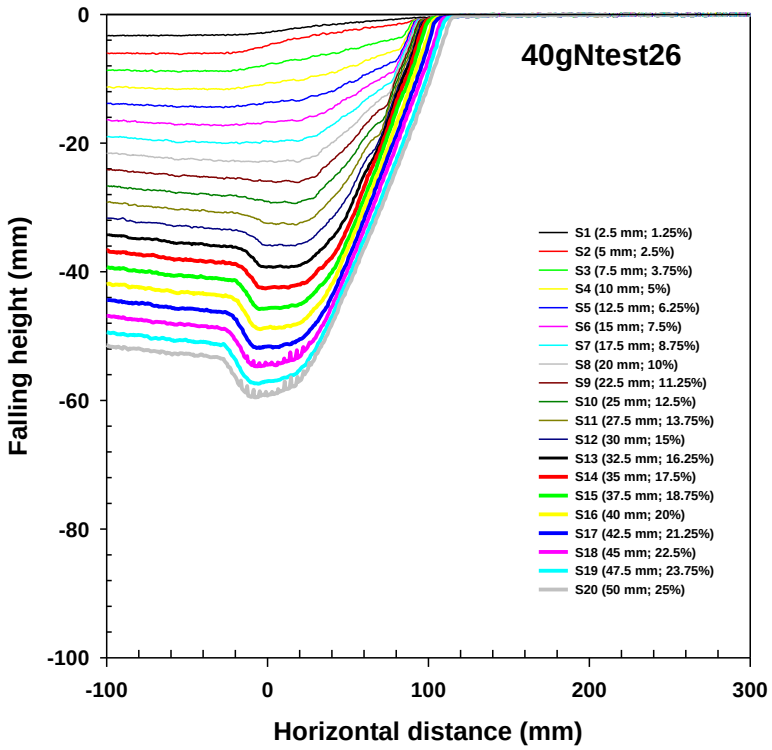


圖 3-2-3 正斷層錯動試驗(40gNtest26，Dr=70%) ，在不同垂直陷落量下的地表變位剖面

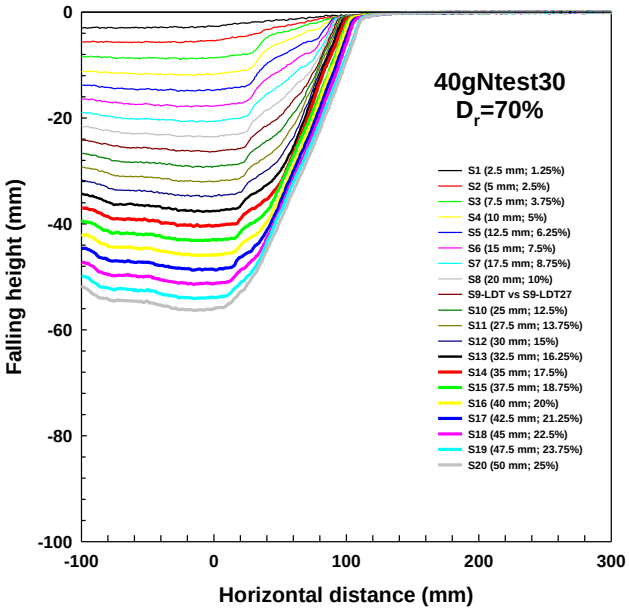


圖 3-2-4 正斷層錯動試驗(40gNtest30，Dr=70%)，在不同垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係

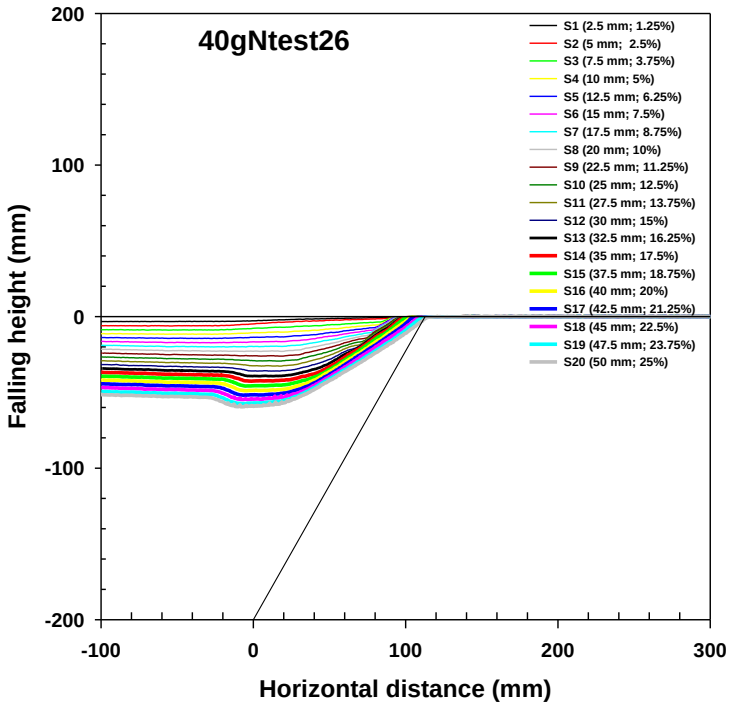


圖 3-2-5 正斷層錯動試驗(40gNtest26，Dr=70%)，在不同垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係

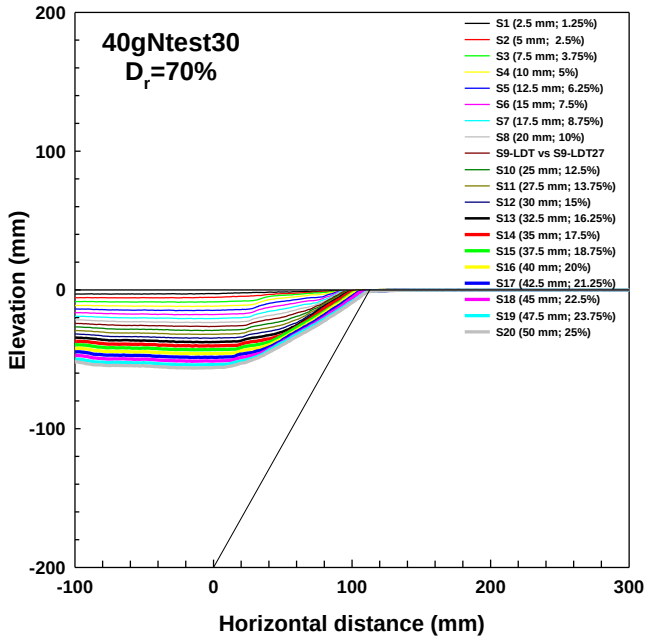


圖 3-2-6 正斷層錯動試驗(40gNtest30，Dr=70%)，在不同垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係

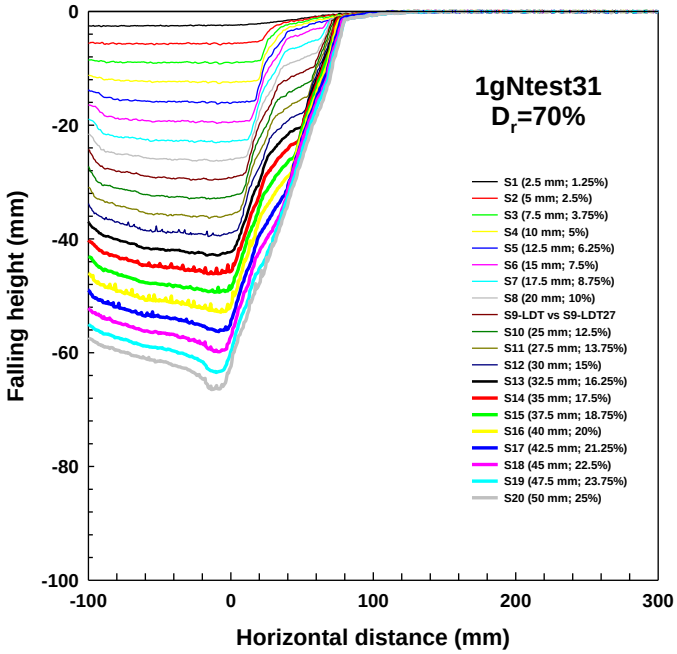


圖 3-2-7 正斷層錯動試驗(1gNtest31，Dr=70%) ，在不同垂直陷落量下的地表變位剖面

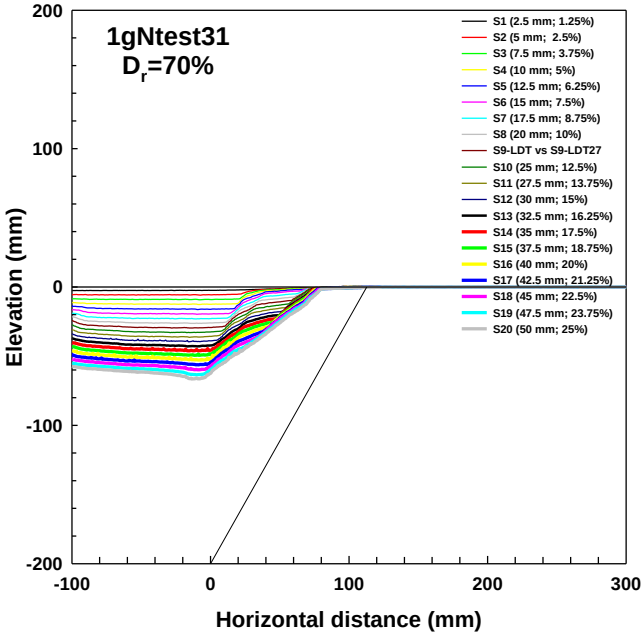


圖 3-2-8 正斷層錯動試驗(1gNtest31，Dr=70%)，在不同垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係

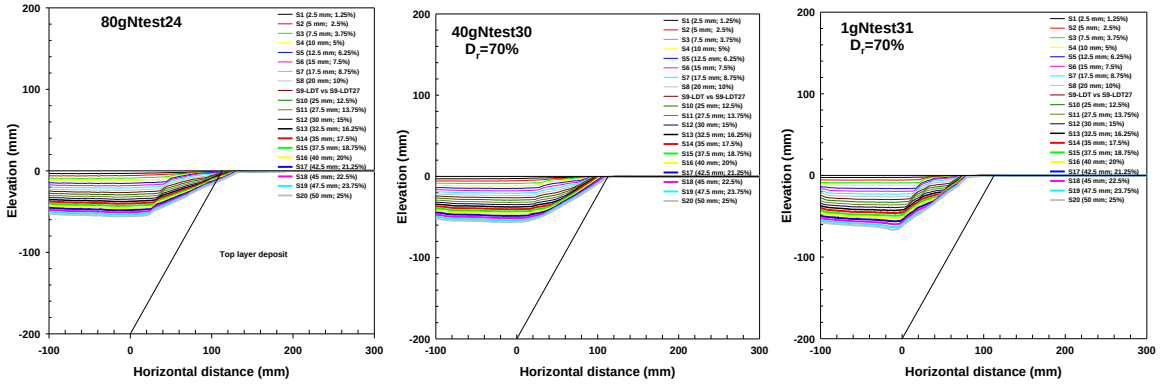


圖 3-2-9 正斷層錯動試驗，在不同 g 值及垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係

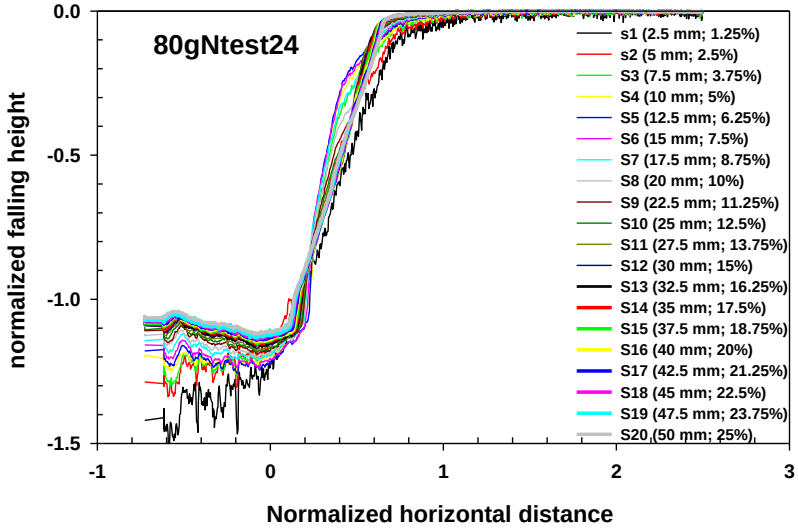


圖 3-2-10 正斷層錯動試驗，在不同垂直陷落量下，正規化地表變位剖面與正規化水平距離關係(80gNtest24)

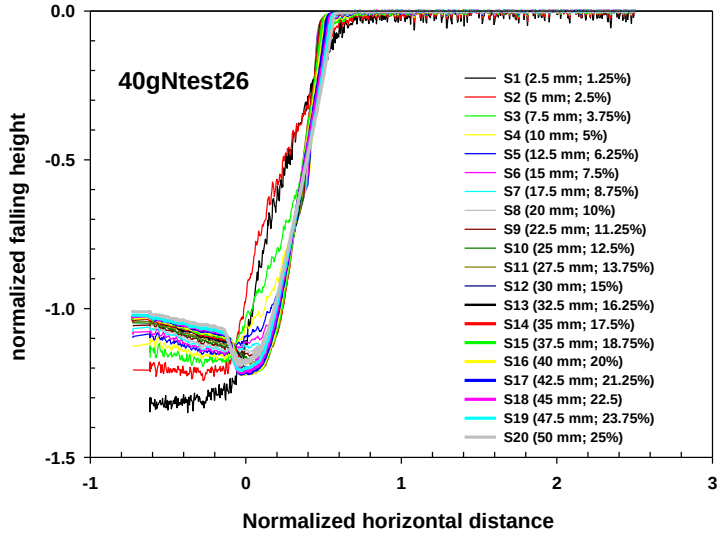


圖 3-2-11 正斷層錯動試驗(40gNtest26)，在不同垂直陷落量下，正規化地表變位剖面與正規化水平距離關係

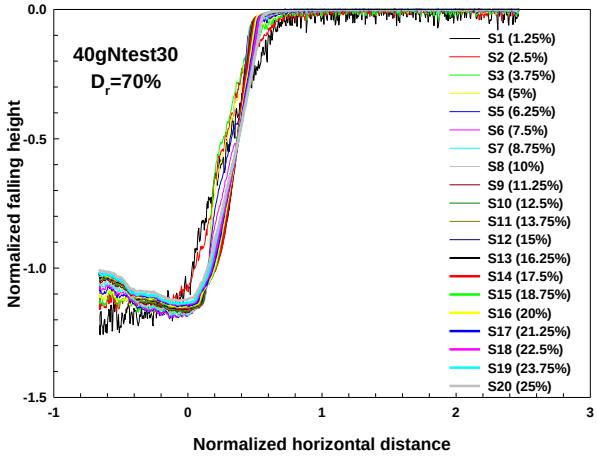


圖 3-2-12 正斷層錯動試驗(40gNtest30)，在不同垂直陷落量下，正規化地表變位剖面與正規化水平距離關係

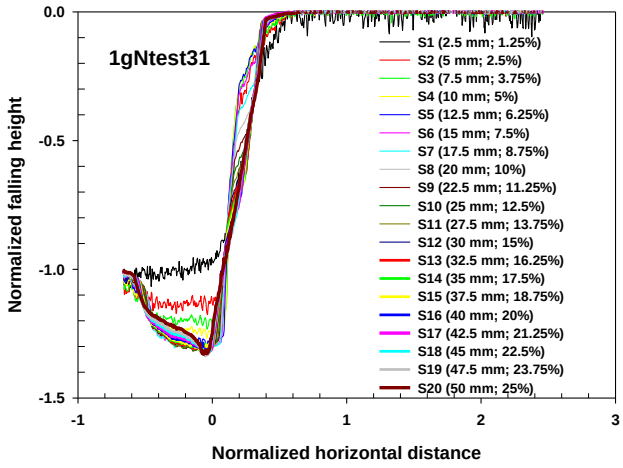


圖 3-2-13 正斷層錯動試驗(1gNtest31)，在不同垂直陷落量下，正規化地表變位剖面與正規化水平距離關係

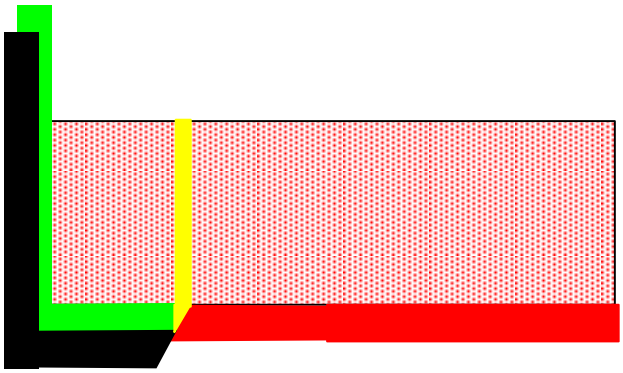


圖 3-2-14 正斷層錯動時上覆土層體積的變化關係

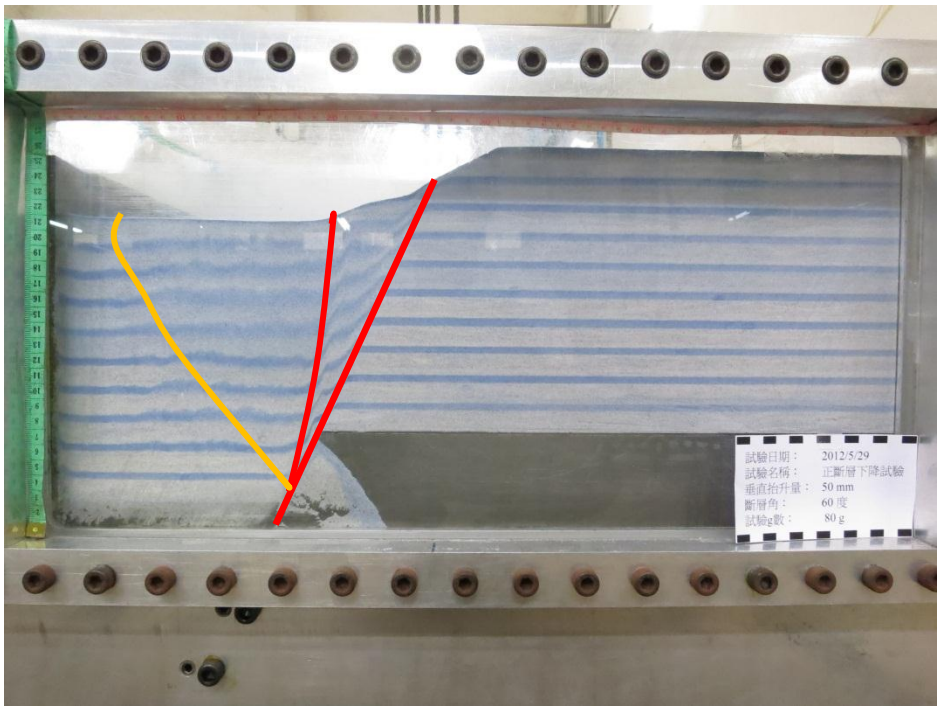


圖 3-2-15 正斷層錯動陷落試驗在 80g 試驗條件下，垂直陷落距離(50mm; 25%)的斷層側剖面(80gNtest24)

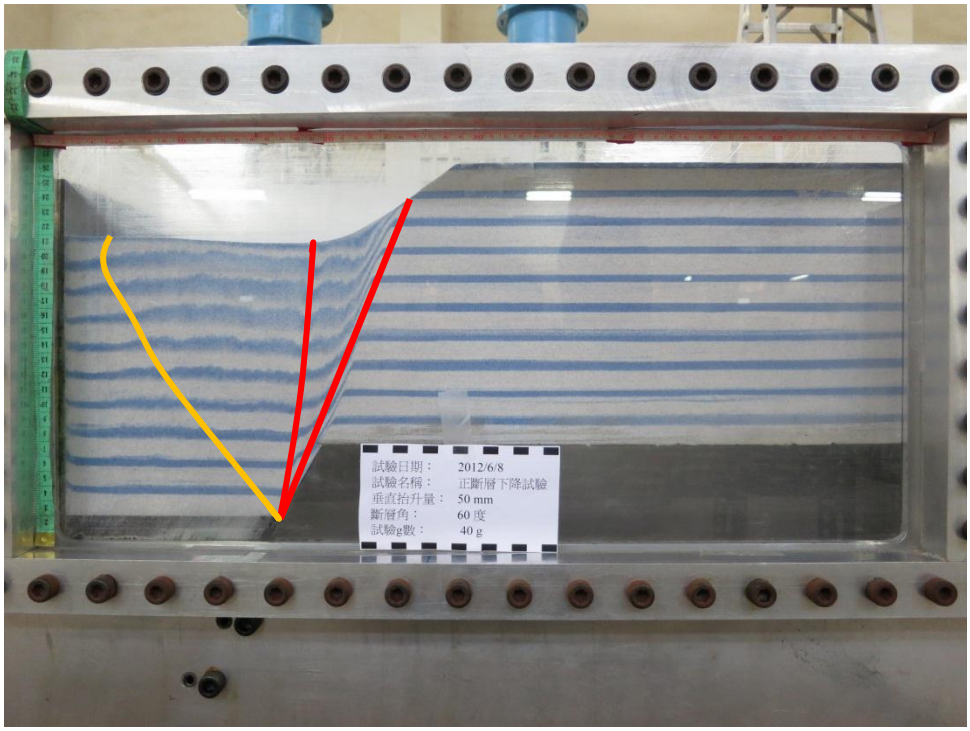


圖 3-2-16 正斷層錯動試驗在 40g 試驗條件下，垂直陷落距離(50mm; 25%)的斷層側剖面(40gNtest26)

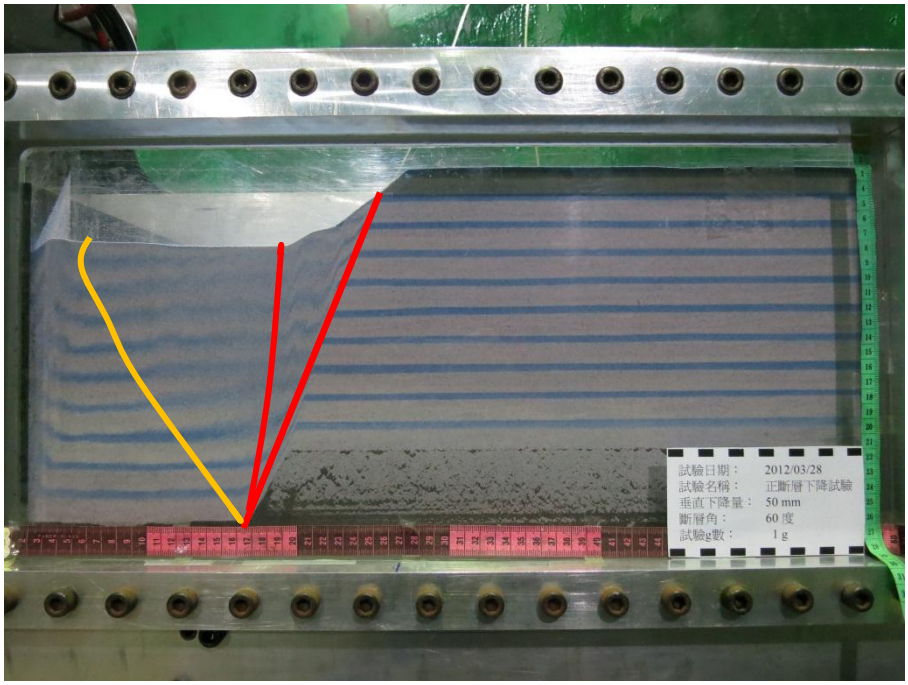


圖 3-2-17 正斷層錯動試驗在 1g 試驗條件下，垂直陷落距離(50mm; 25%)的斷層側剖面(1gNtest18)

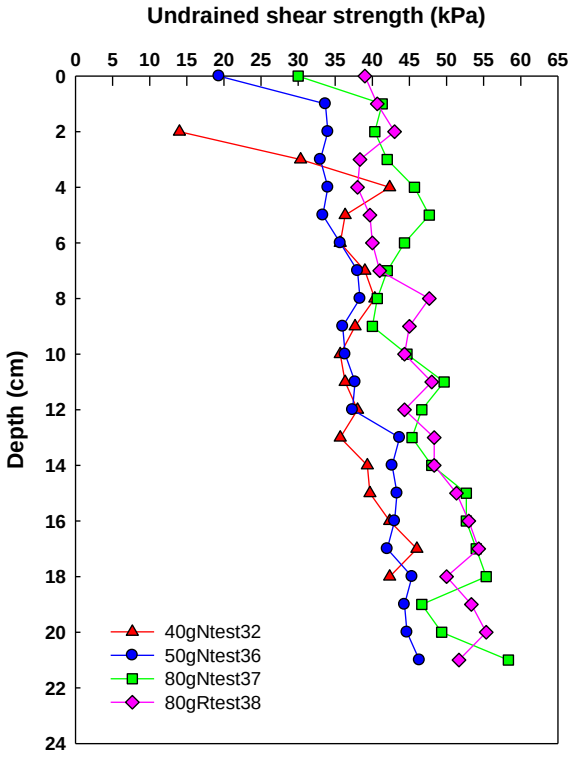


圖 3-2-18 黏土試體十字片剪不排水剪力強度隨深度變化(N40gNtest32-C、50gNtest36-C、80gNtest37、80gRtest38)

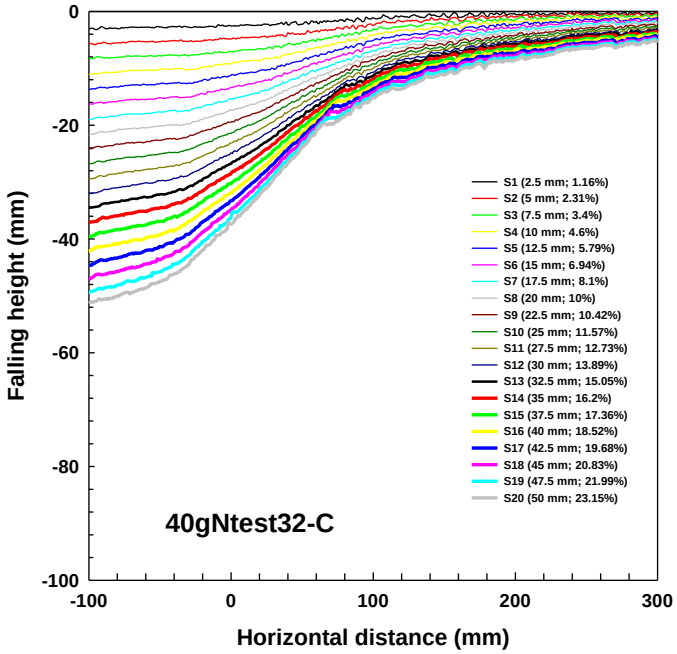


圖 3-2-19 正斷層錯動試驗(40gNtest32-C)，在不同垂直陷落量下的地表變位剖面

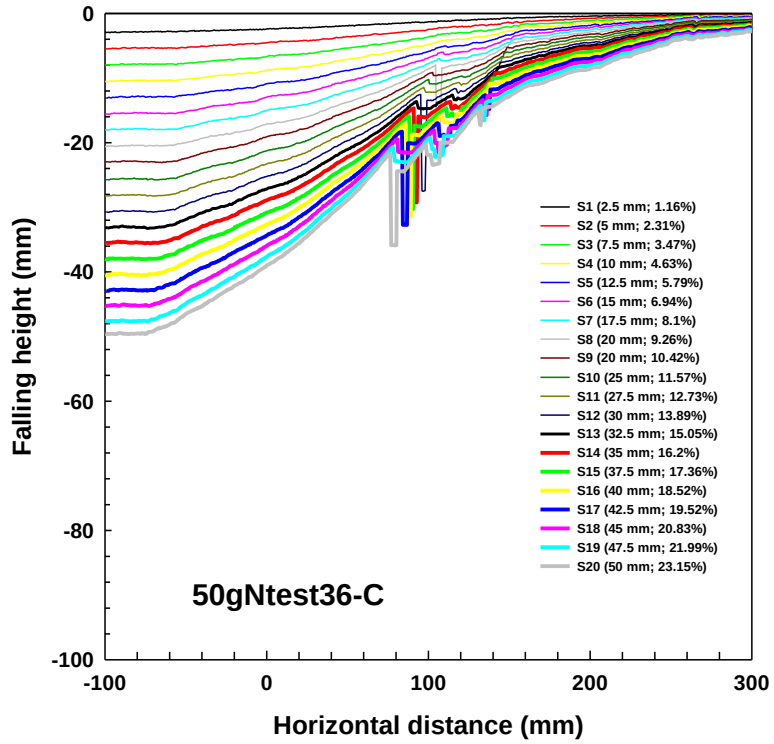


圖 3-2-20 正斷層錯動試驗(50gNtest36-C)，在不同垂直陷落量下的地表變位剖面

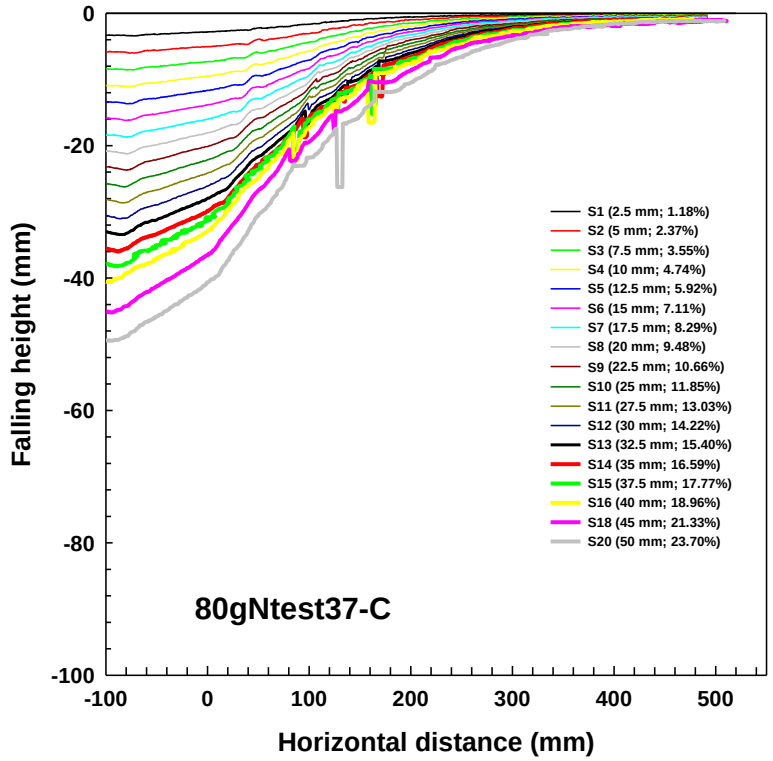


圖 3-2-21 正斷層錯動試驗(80gNtest37-C)，在不同垂直陷落量下的地表變位剖面

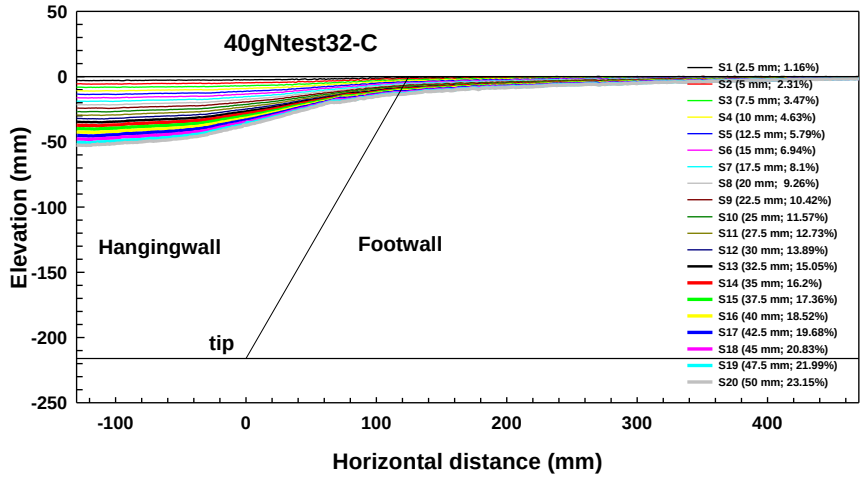


圖 3-2-22 正斷層錯動試驗(40gNtest32-C)，在不同垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係

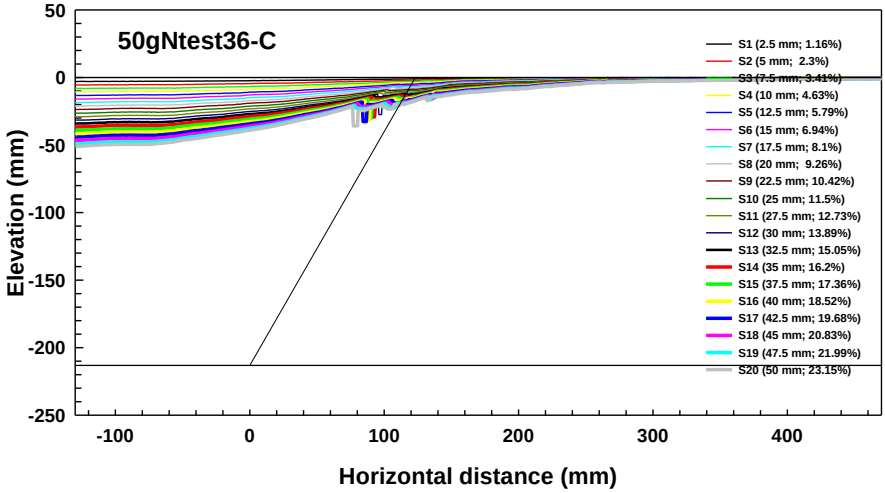


圖 3-2-23 正斷層錯動試驗(50gNtest36-C)，在不同垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係

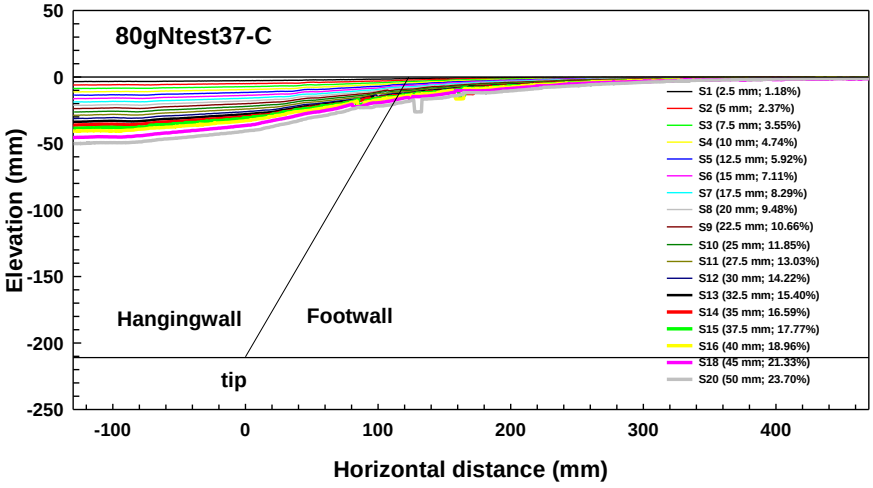


圖 3-2-24 正斷層錯動試驗(80gNtest37-C)，在不同垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係

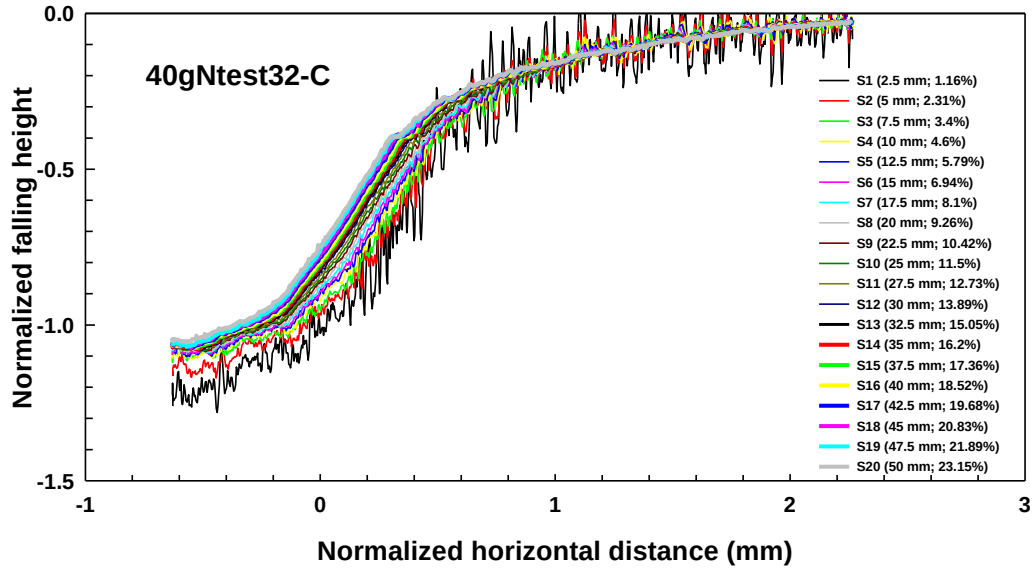


圖 3-2-25 正斷層錯動試驗(40gNtest32-C)，不同垂直陷落量下，正規化地表變位剖面與正規化水平距離關係

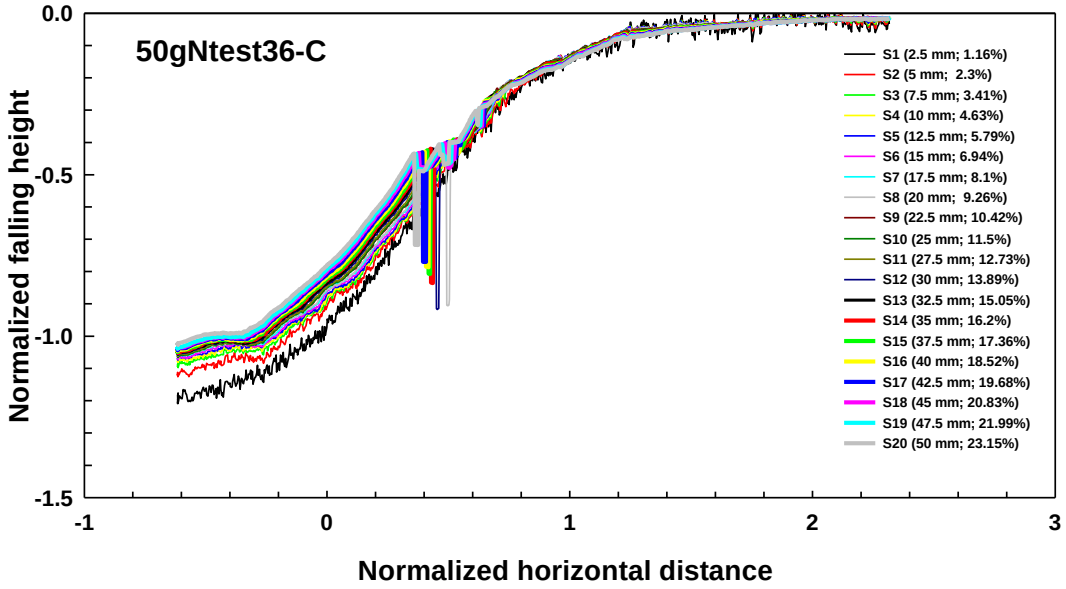


圖 3-2-26 正斷層錯動試驗(50gNtest36-C)，不同垂直陷落量下，正規化地表變位剖面與正規化水平距離關係

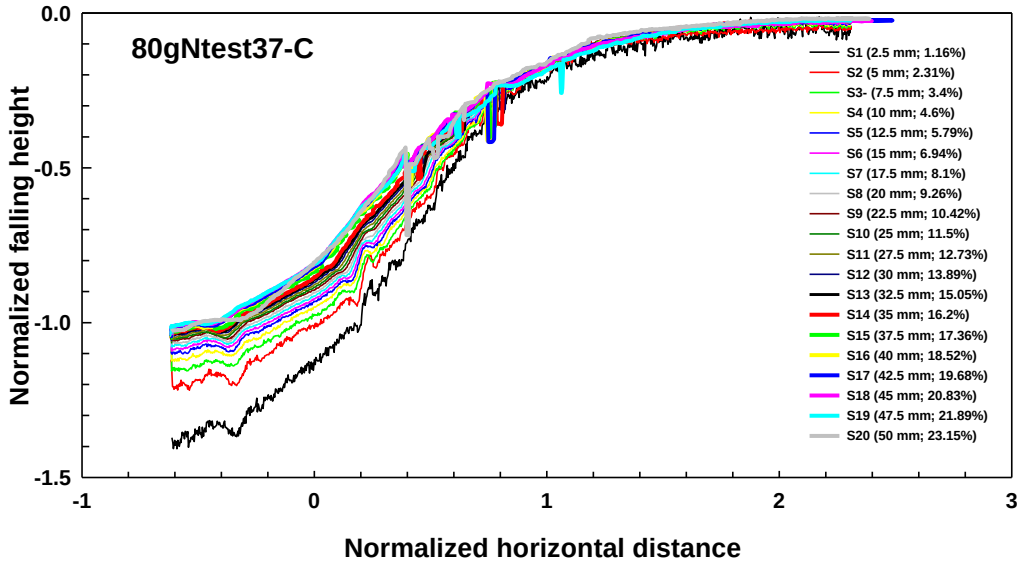


圖 3-2-27 正斷層錯動試驗(80gNtest37-C)，不同垂直陷落量下，正規化地表變位剖面與正規化水平距離關係

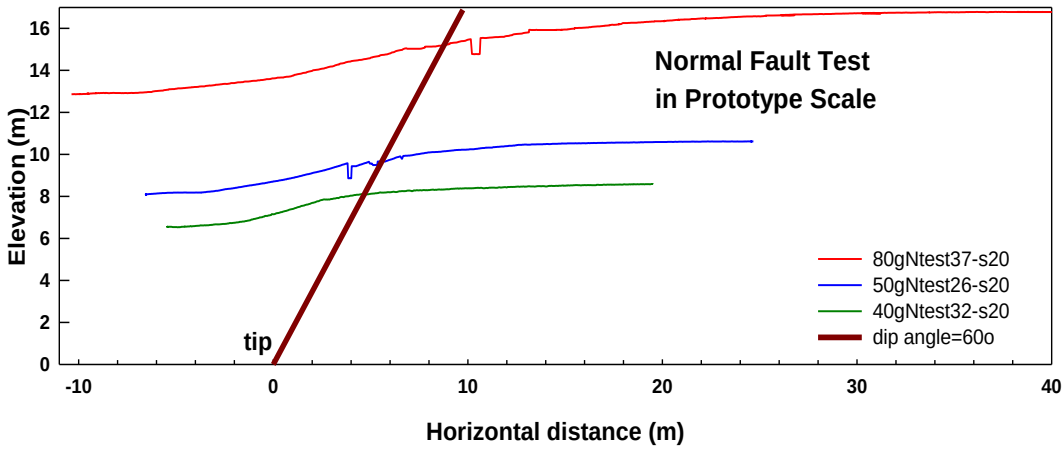


圖 3-2-28 正斷層錯動試驗，在最大垂直陷落量下，原型地表變位剖面與原型水平距離關係

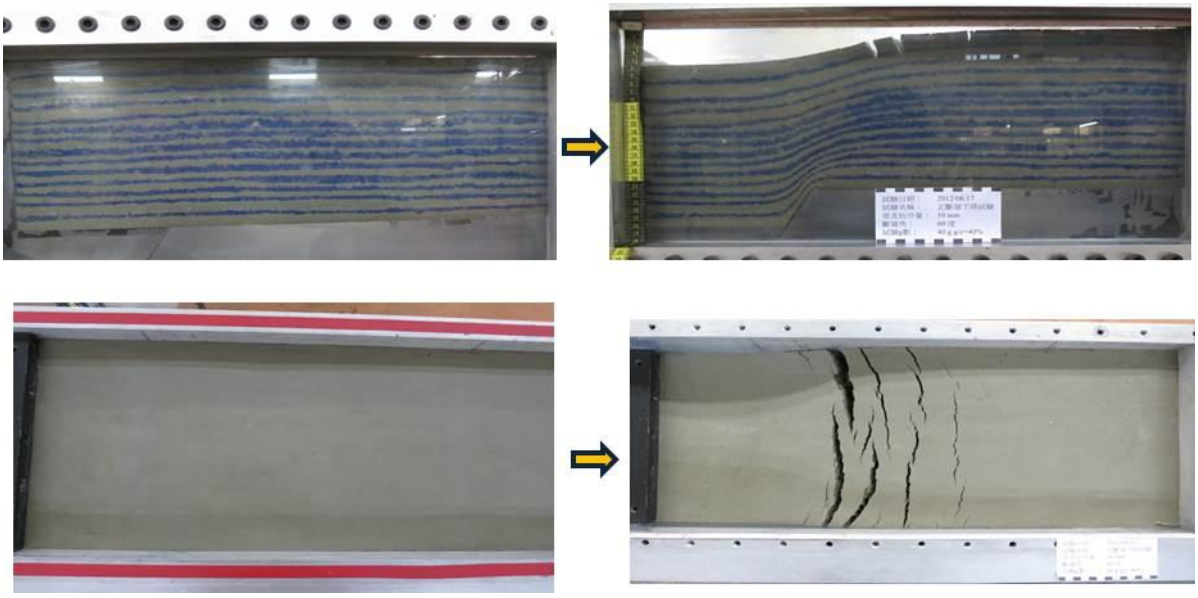


圖 3-2-29 正斷層錯動試驗(40gNtest32-C)，試驗前後(垂直陷落量=5cm)，地表裂縫及側視圖

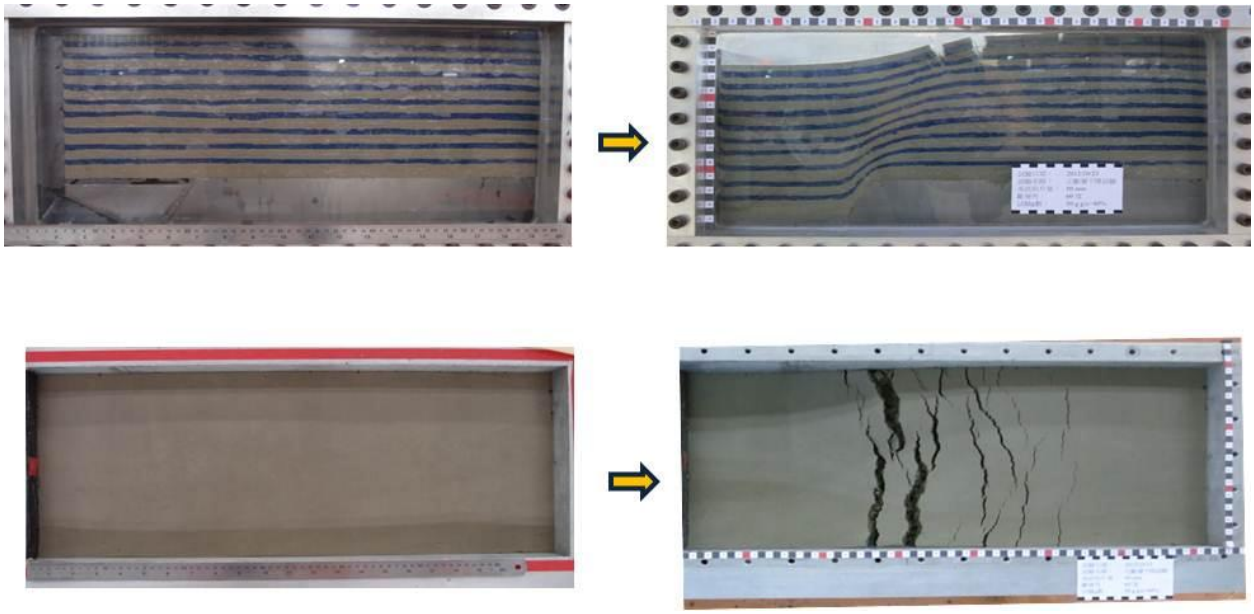


圖 3-2-30 正斷層錯動試驗(50gNtest36-C)，試驗前後(垂直陷落量=5cm)，地表裂縫及側視圖

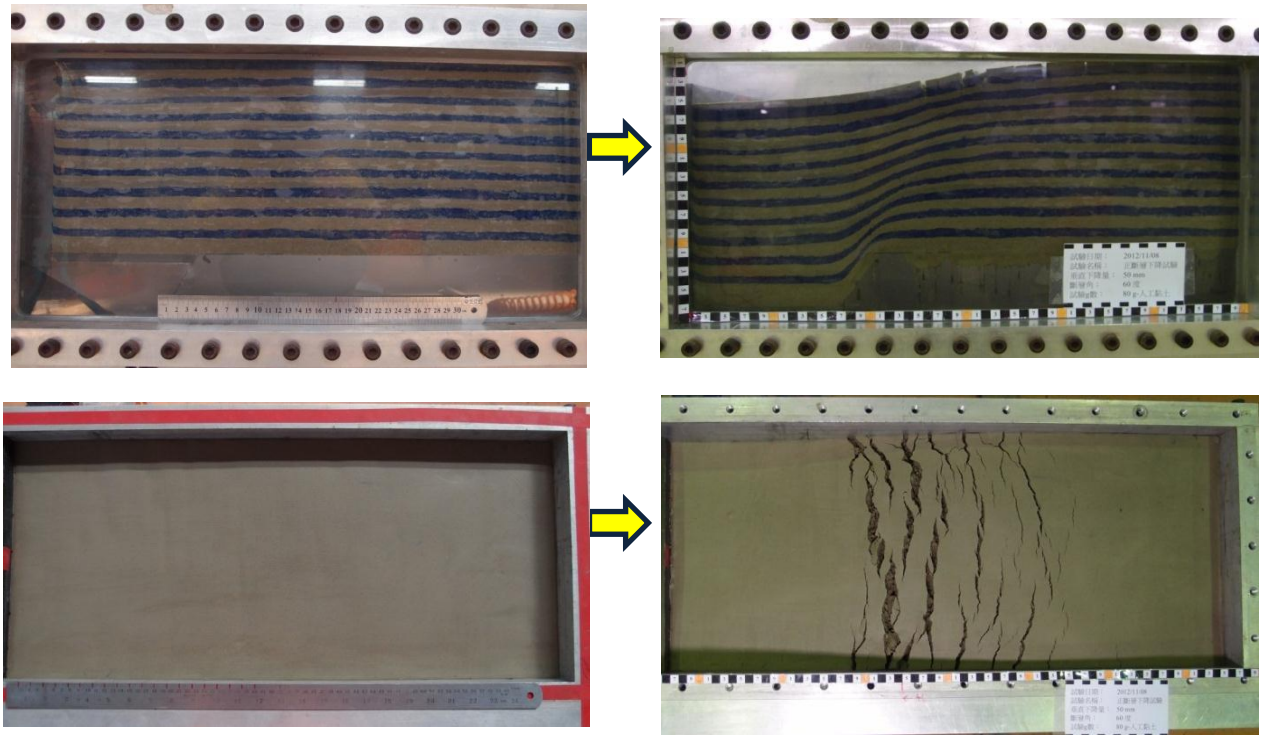


圖 3-2-31 正斷層錯動試驗(80gNtest37-C)，試驗前後(垂直陷落量=5cm)，地表裂縫及側視圖

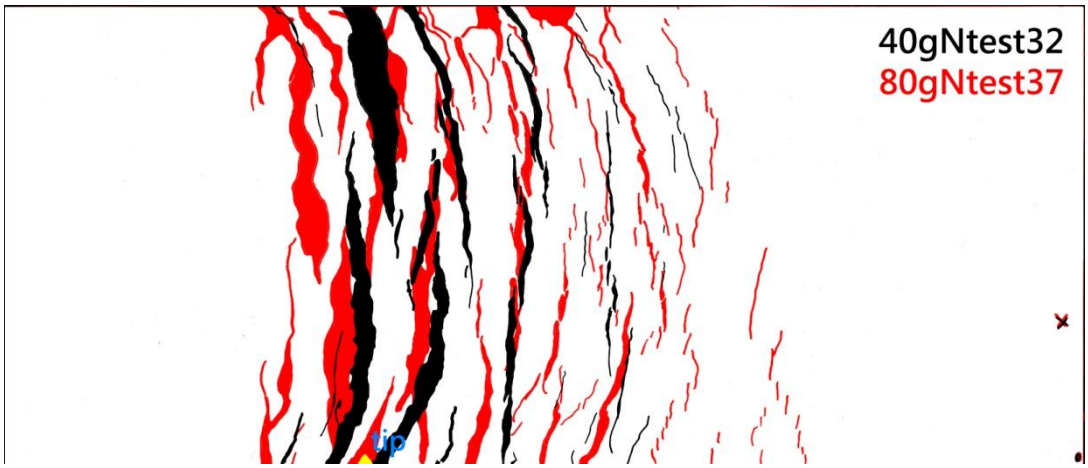


圖 3-2-32 正斷層錯動試驗(40gNtest32-C; 80gNtest37-C)，試驗後(垂直陷落量=5cm)，地表裂縫分佈比較圖

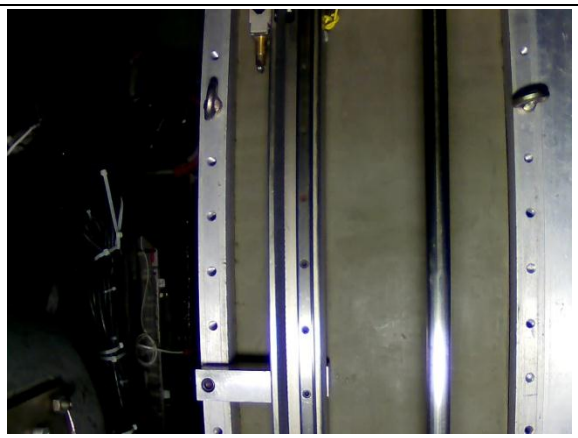
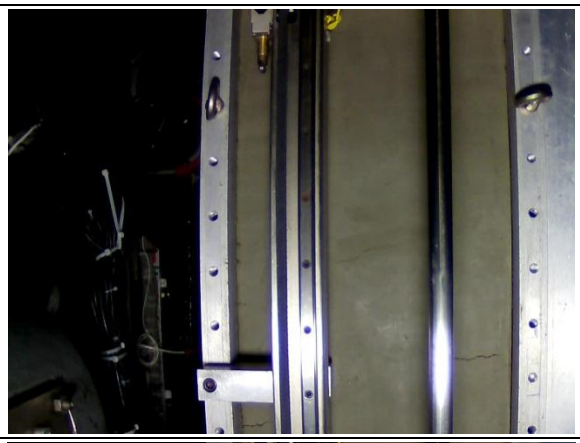
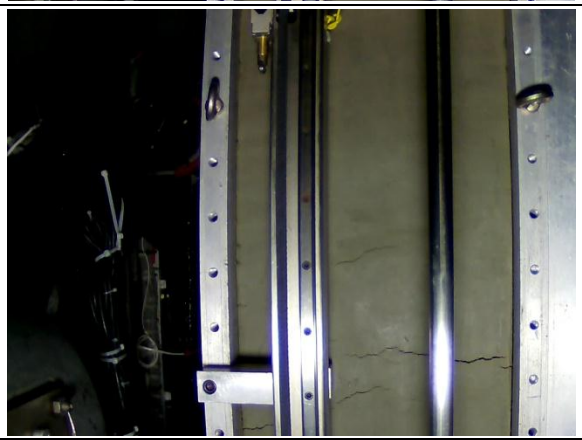
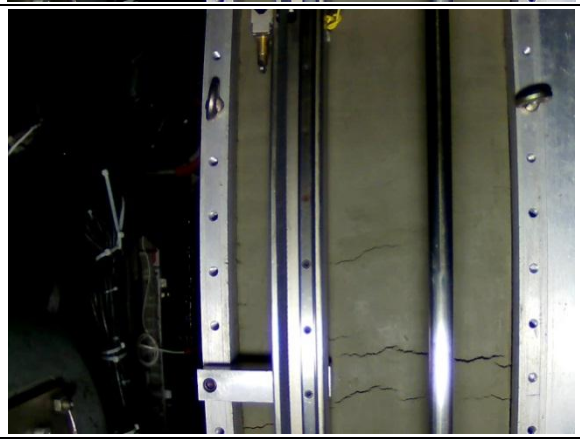
編號	下降量	照片
S1	0.25 (cm)	
S2	0.5 (cm)	
S3	0.75 (cm)	
S4	1 (cm)	

圖 3-2-33 正斷層錯動試驗(50gNtest36-C)，在不同垂直錯動量下地表裂縫的發展情形

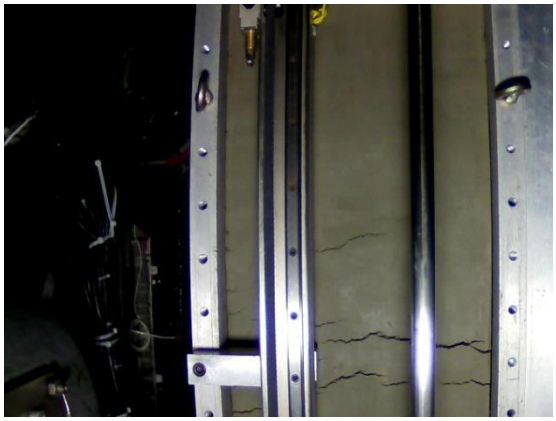
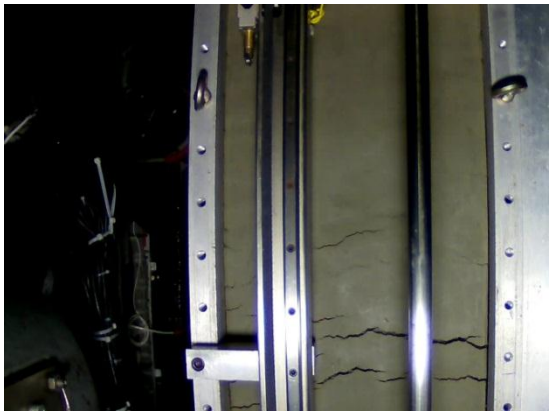
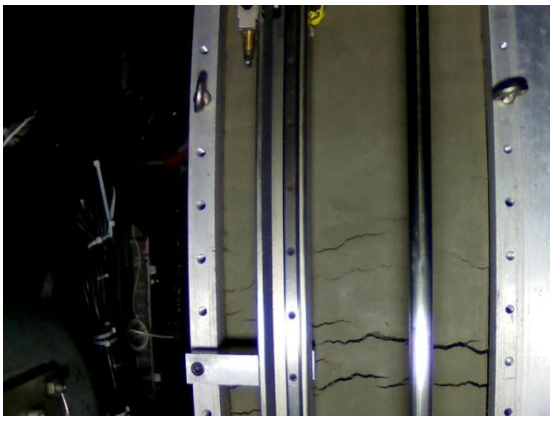
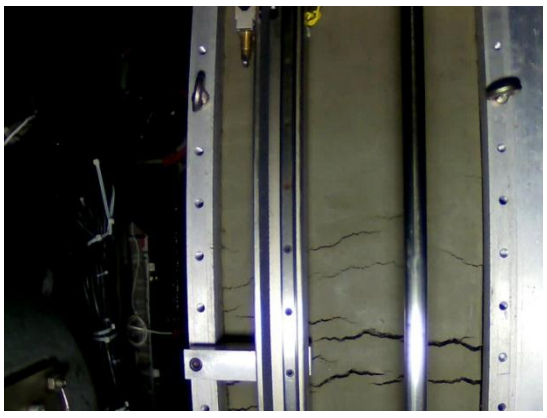
S5	1.25 (cm)	
S6	1.5 (cm)	
S7	1.75 (cm)	
S8	2 (cm)	

圖 3-2-33 正斷層錯動試驗(50gNtest36-C)，在不同垂直錯動量下地表裂縫的發展情形(續)

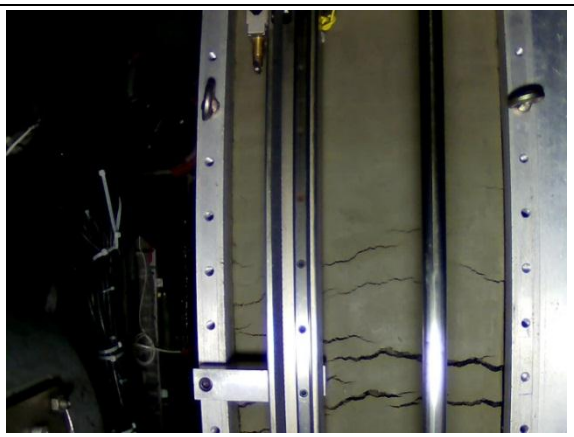
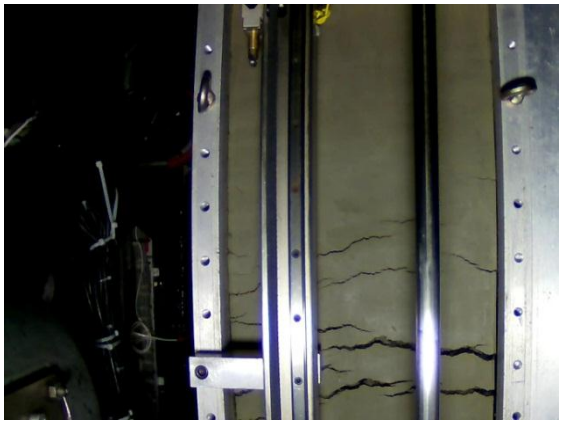
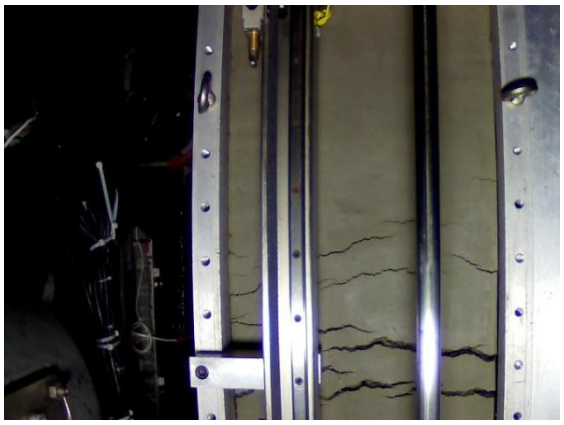
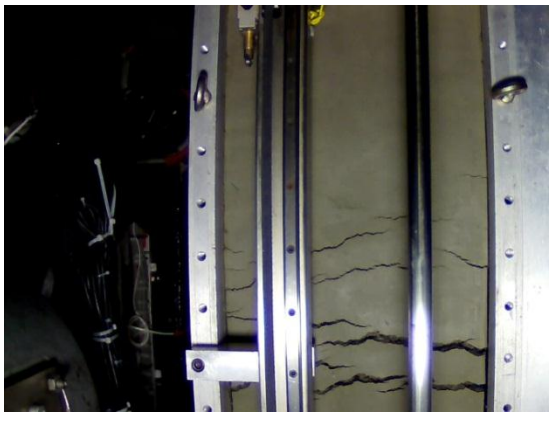
S9	2.25 (cm)	
S10	2.5 (cm)	
S11	2.75 (cm)	
S12	3 (cm)	

圖 3-2-33 正斷層錯動試驗(50gNtest36-C)，在不同垂直錯動量下地表裂縫的發展情形(續)

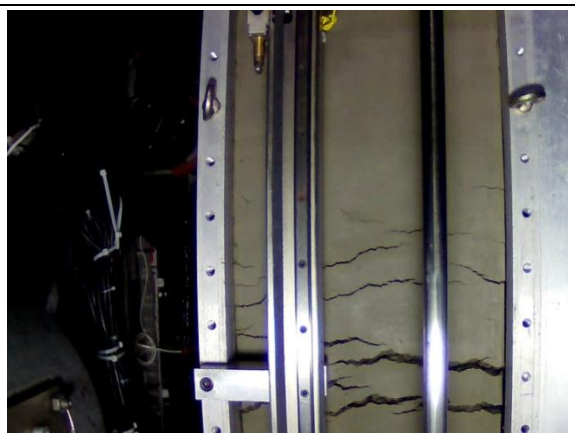
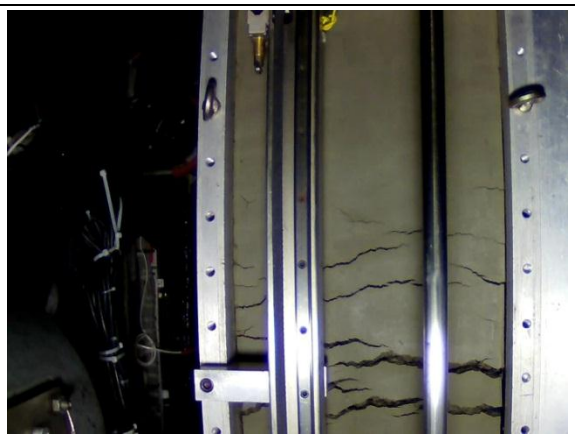
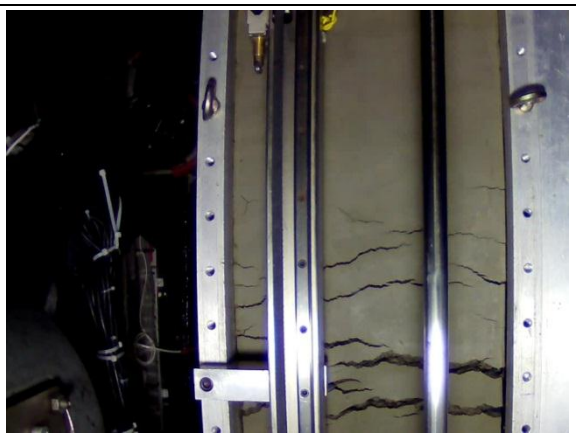
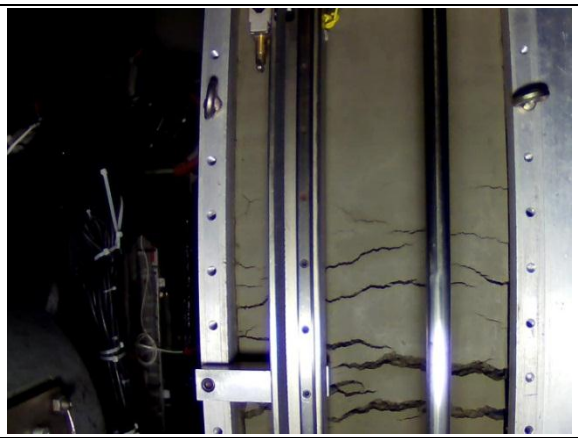
S13	3.25 (cm)	
S14	3.5 (cm)	
S15	3.75 (cm)	
S16	4 (cm)	

圖 3-2-33 正斷層錯動試驗(50gNtest36-C)，在不同垂直錯動量下地表裂縫的發展情形(續)

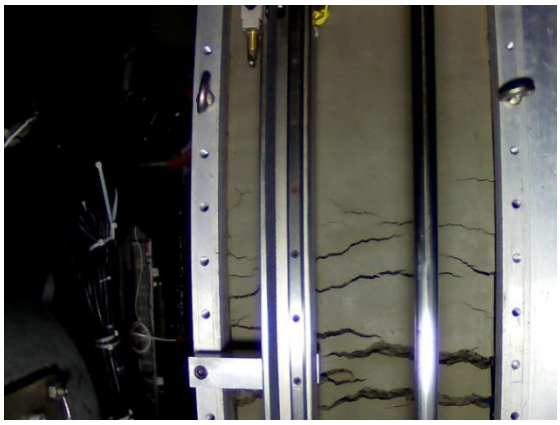
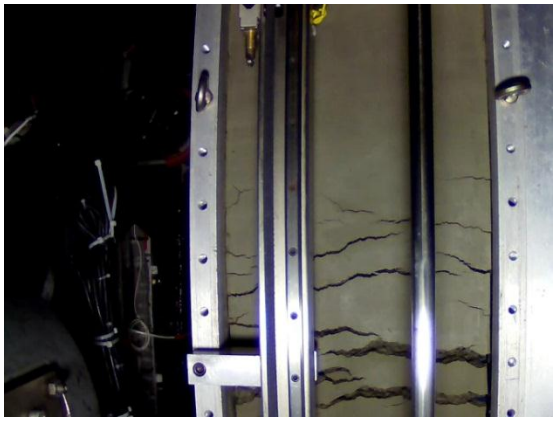
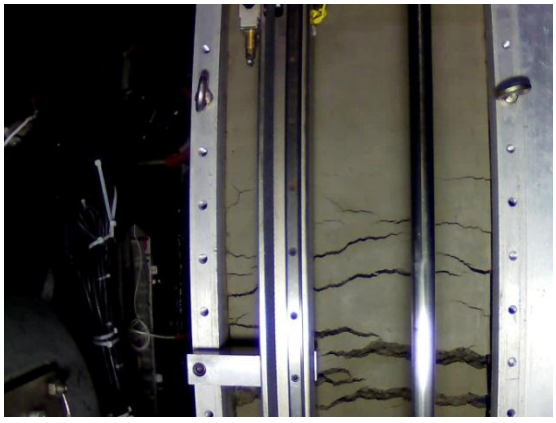
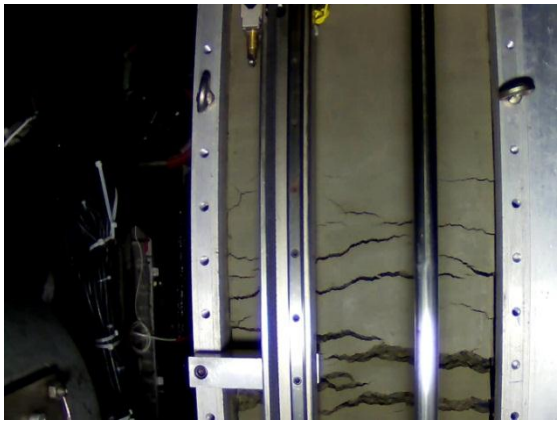
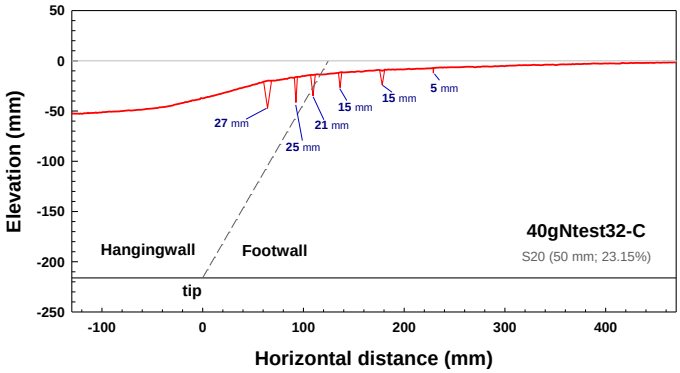
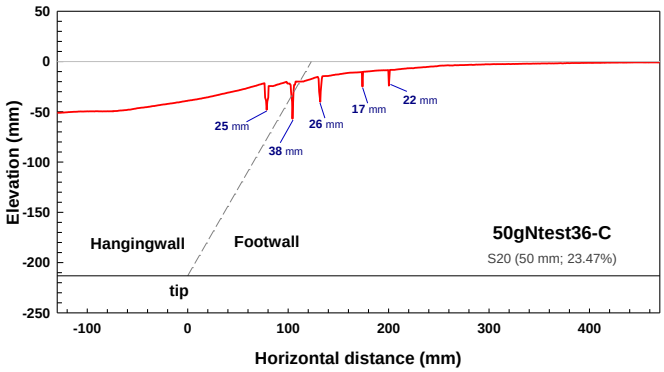
S17	4.25 (cm)	
S18	4.5 (cm)	
S19	4.75 (cm)	
S20	5 (cm)	

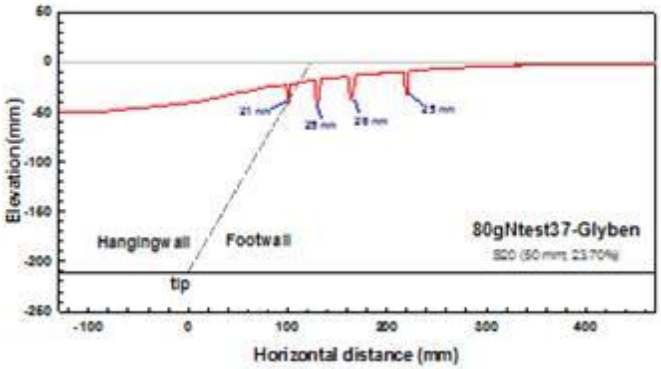
圖 3-2-33 正斷層錯動試驗(50gNtest36-C)，在不同垂直錯動量下地表裂縫的發展情形(續)



(a)40gNtest32-C



(b)50gNtest36-C



(c)80gNtest37-C

圖 3-2-34 正斷層錯動試驗,在垂直錯動量 5cm ,主要地表裂縫的寬度及深度發展情形(S20)

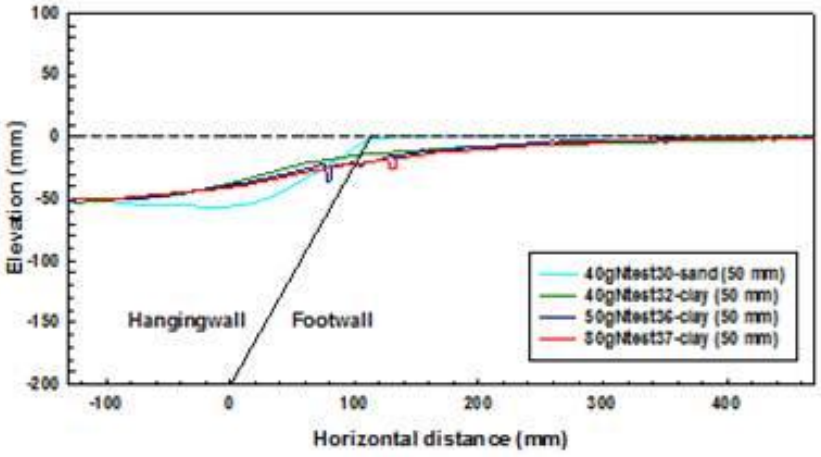


圖 3-2-35 砂試體及黏土試體正斷層錯動試驗，垂直陷落量=5cm 時，地表變形剖面之比較

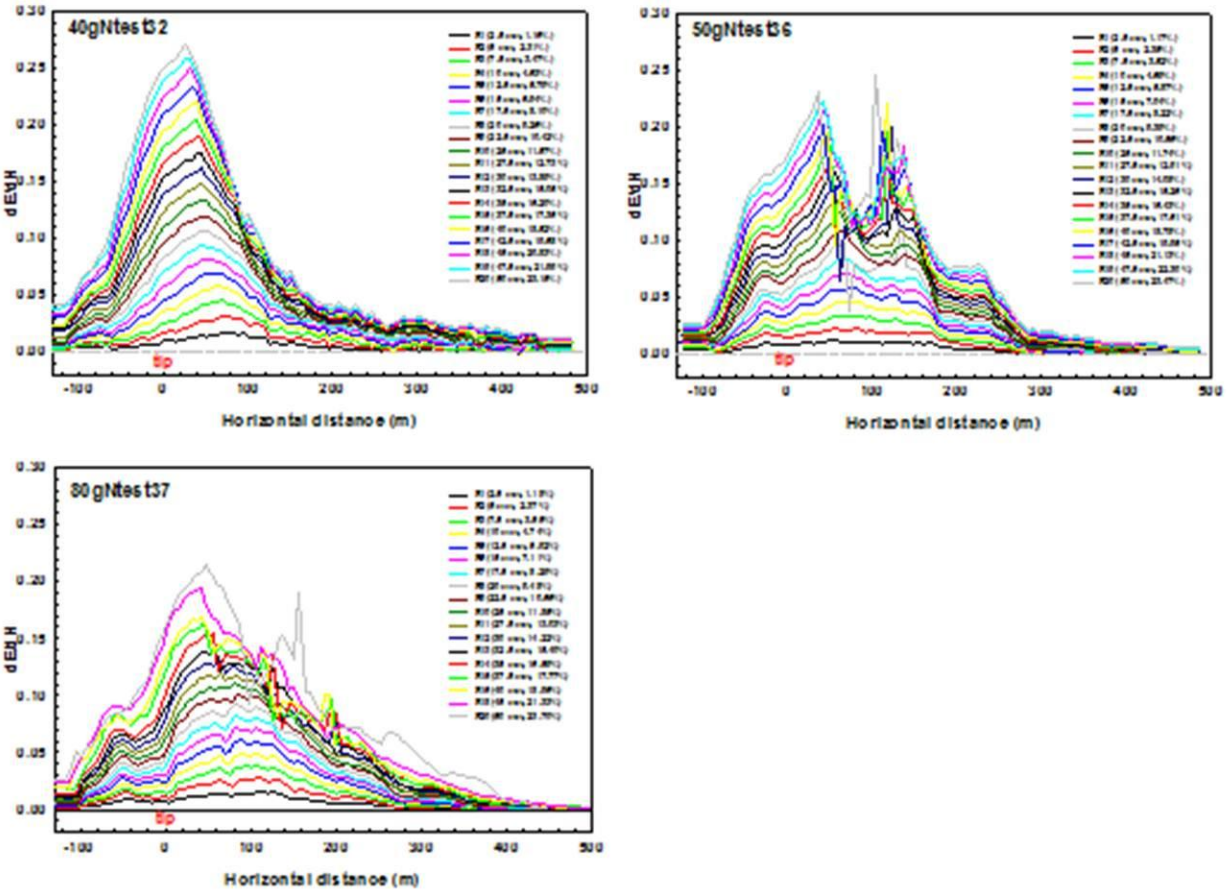


圖 3-2-36 黏土試體正斷層錯動試驗，不同 g 值下，不同垂直陷落量時，地表角變形之比較

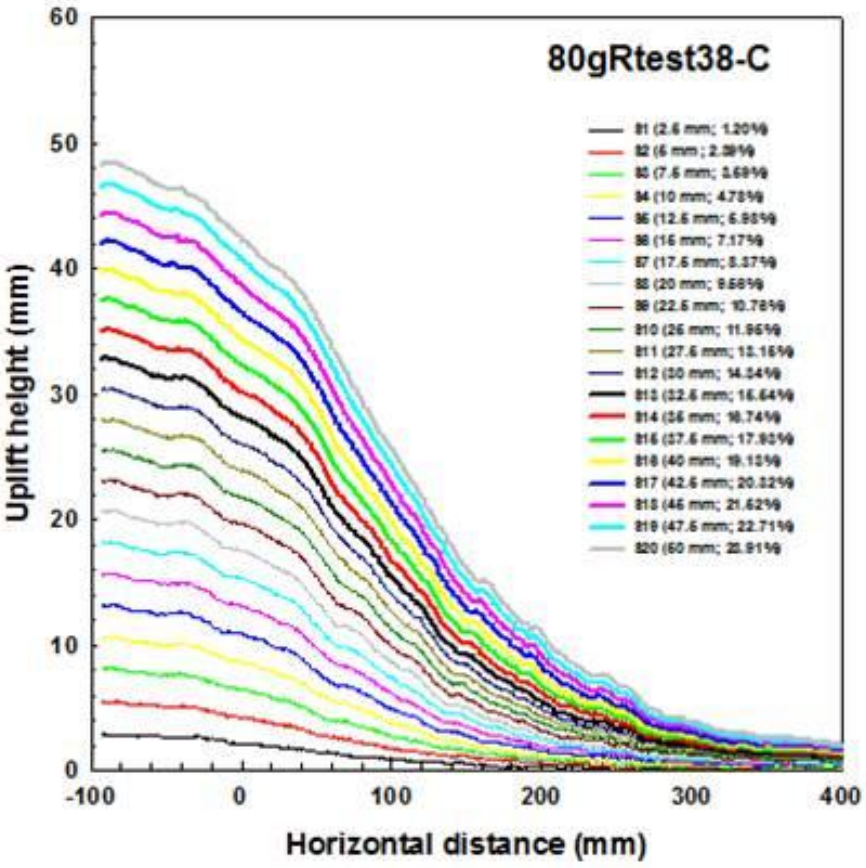


圖 3-2-37 黏土層逆斷層錯動試驗(80gRtest38-C)，在不同垂直陷落量下的地表變位剖面

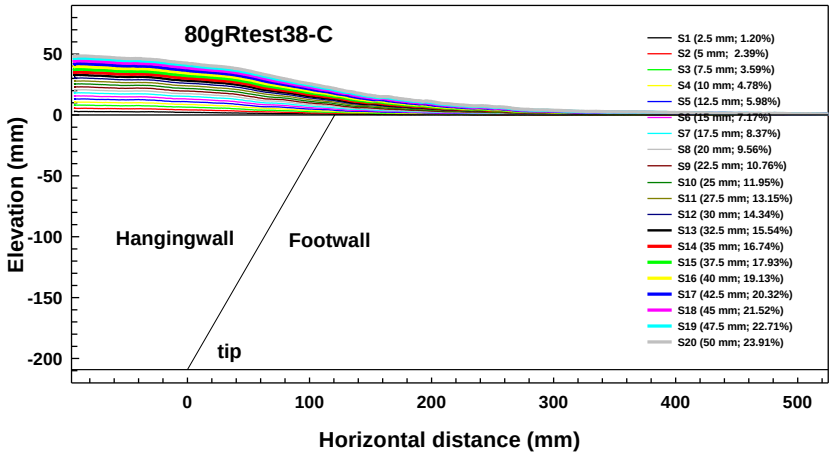


圖 3-2-38 黏土層逆斷層錯動試驗，在不同垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係

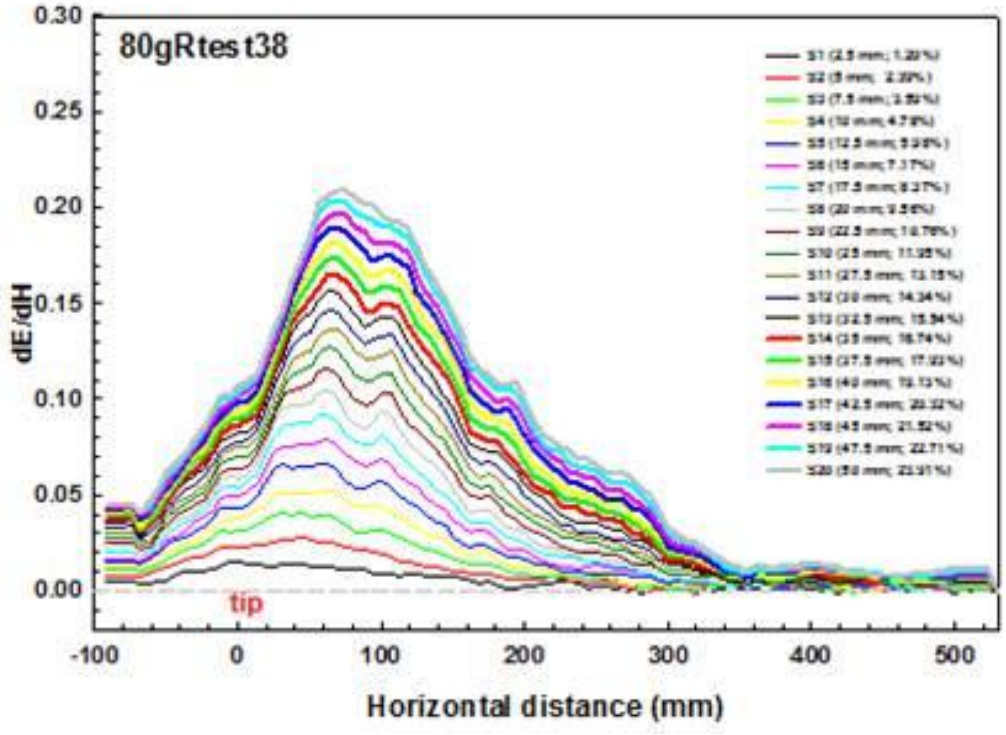


圖 3-2-39 黏土層逆斷層錯動試驗，在不同頂升量下，地表角變形之比較

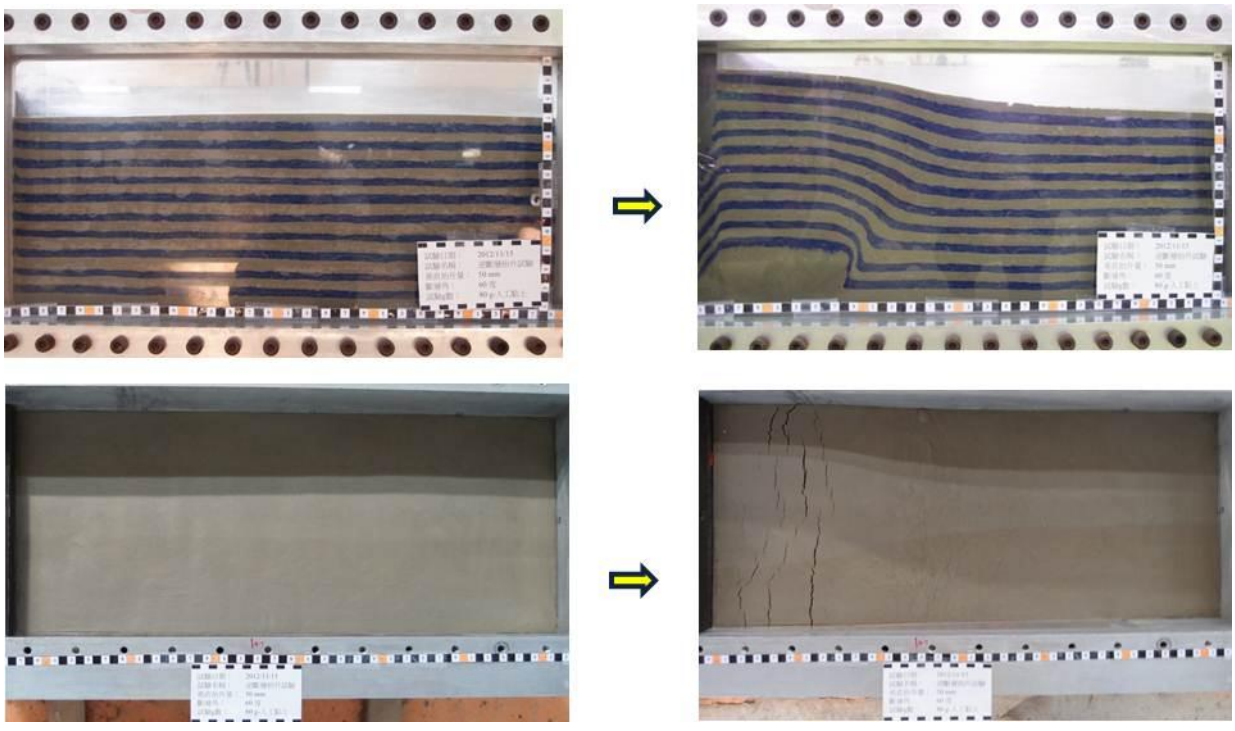


圖 3-2-40 逆斷層錯動試驗(80gRtest38-C)，試驗前後(垂直陷落量=5cm)，地表裂縫分佈及側視圖

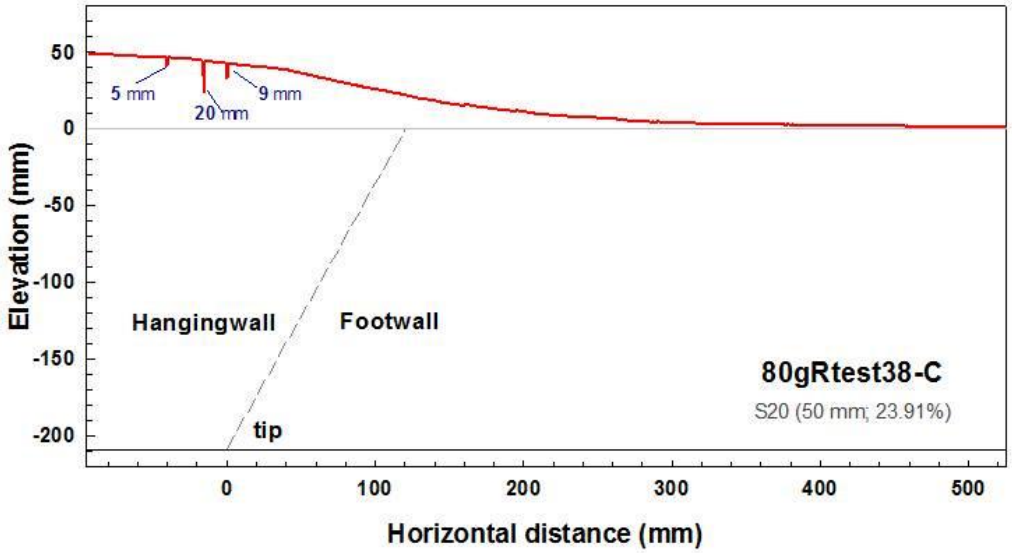


圖 3-2-41 逆斷層錯動試驗,在垂直錯動量 5cm ,主要地表裂縫的寬度及深度發展情形(S20)

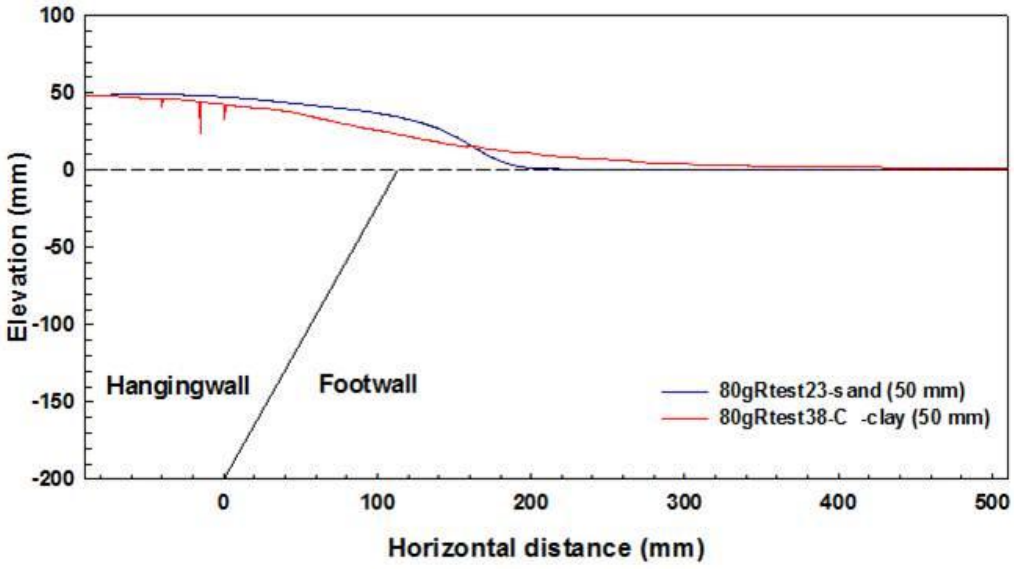


圖 3-2-42 砂土試體及黏土試體逆斷層錯動試驗，垂直陷落量=5cm 時，地表變形剖面比較

3.3. 數值分析

3.3.1. PFC 微觀參數模擬比較-直剪實驗模擬

本研究為使得數值模型之巨觀參數得以利用微觀參數之調整而得，因此進行一系列數值模擬直剪試驗，並歸納在不同微觀參數下(包括正向勁度、切向勁度以及顆粒摩擦數)，顆粒群所代表之巨觀力學參數(如凝聚力，摩擦角等)。

由圖 3-3-1 可以得知，在所分析之切向勁度範圍內，切向勁度之變化(同一個正向勁度值下)對於摩擦角之影響並不大，而當正向勁度增加時，所反應出之摩擦角會隨著所輸入之摩擦係數而增加，但隨著摩擦係數增加至 0.8 時，所反應之摩擦角最大也只約略到達 32 度。另外，當顆粒摩擦係數假設為零時，因為正向勁度與切向勁度亦會貢獻部分之摩擦角，因此，可以從圖 3-3-1 看到顆粒群之基本摩擦角約略位於 8 度到 13 度左右。由於圖中顯示出摩擦角的增加可以藉由增加顆粒摩擦係數以及正向、切向勁度來達成，因此，後續研究將持續補充可供分析使用之摩擦角所對應之微觀參數。

在模型分析上，當分析之土層有指定之摩擦角，建議可先參考圖 3-3-1 得到對應之微觀參數，並比對在物理試驗下砂箱土層表面之變位，以進一步驗證圖 3-3-1 之正確性。

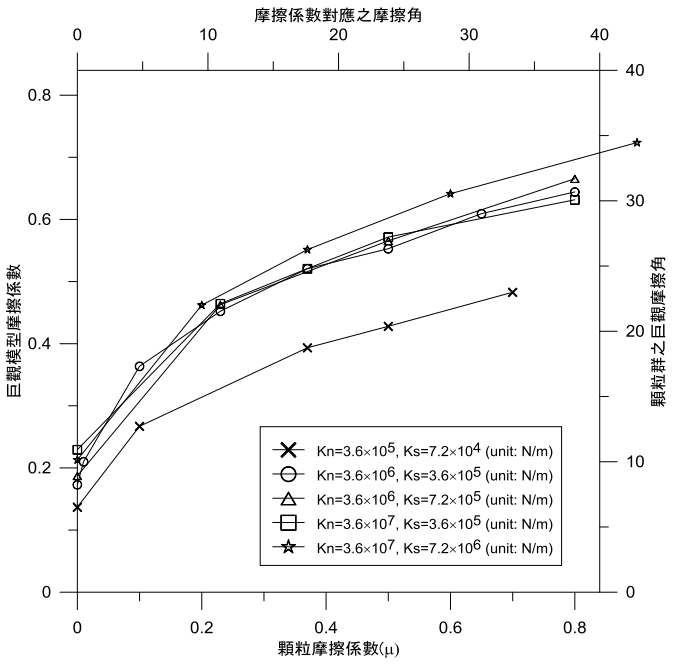


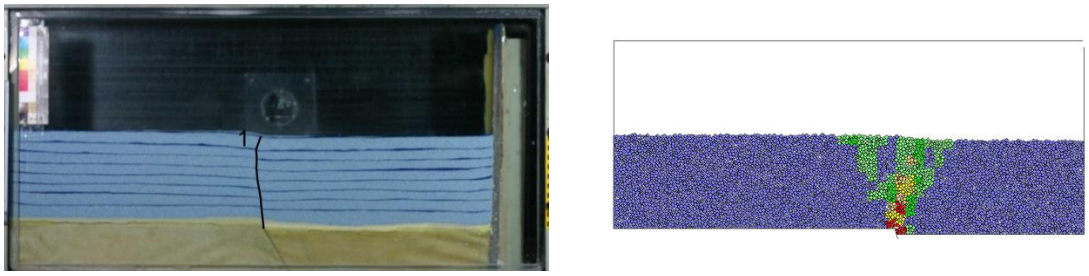
圖 3-3-1 直剪試驗數值模擬下微觀與巨觀摩擦角之關係

3.3.2. 1g 模擬

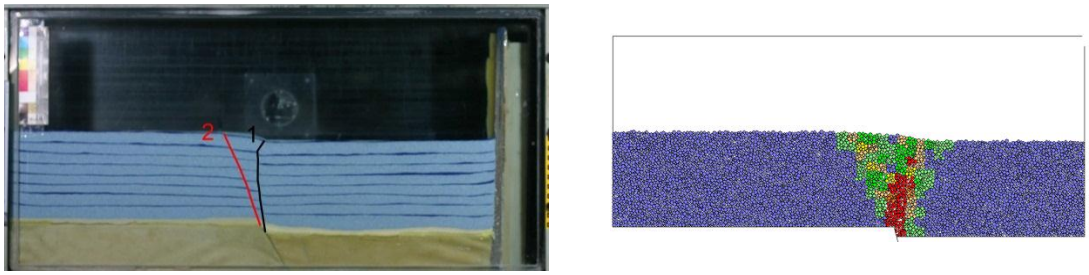
i. 比較砂箱實驗結果與數值模擬

如圖 3-3-2 所示為本研究之數值模擬結果與陳師賢(2007)之砂箱實驗中第一組之結果(圖 2-3-6)比對，由比對結果可以看到當$\Delta H/H = 6\%$時，砂箱實驗中的第一條剪切帶發展至地表，而數值模擬中的剪切帶發展比較快，已經發展出兩條剪切帶至地表，且後發展出來的第二條剪切帶相較於第一條剪切帶比較靠近下盤；當$\Delta H/H = 10\%$時，砂箱實驗中的第二條剪切帶發展至地表，與數值模擬結果一樣的是第二條相較於第一條剪切帶的位置是靠近下盤的；圖 3-3-2(c)代表基盤錯動了 4cm 之後鋪設新的砂土層，因此砂箱實驗中的剪切帶改以虛線表示，與數值模擬中的剪切帶範圍相仿；一層生長地層錯動$\Delta H/H = 2\%$時，砂箱實驗中的剪切帶發展至生長地層內，並且可以看到生長地層內的剪切帶是沿著既有剪切帶中最靠近下盤的那一條繼續往地表發展，數值模擬的結果與這些現象一致；$\Delta H/H = 3\%$時砂箱實驗中的剪切帶發展至地表，數值模擬的結果也與此現象一致。由以上的結果可以看到數值模擬之結果在比對砂箱實驗的結果上，除了一開始的剪切帶發展比較快之外，其定性比較的結果甚是穩合。

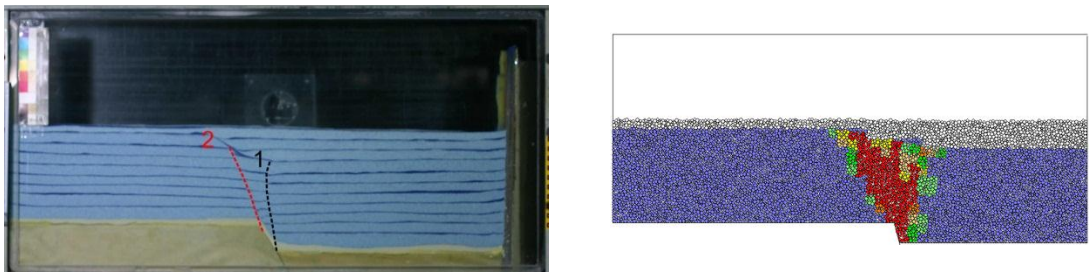
圖 3-3-3 所示為比較砂箱實驗及數值模擬中剪切帶發展高度(H_F/H_1)與發展寬度(W_F/H_1)的結果，由圖 3-3-3(a)可以看到在單一土層中數值模擬的剪切帶在$\Delta H/H = 4\%$時發展至地表，而砂箱實驗則是在$\frac{\Delta H}{H} = 4\sim6\%$發展至地表，數值模擬的發展比砂箱實驗略快一點，但在生長地層中，不論是一層、二層的數值模擬及砂箱實驗的結果都是在$\Delta H/H = 2\%$時發展至地表，其結果相當穩合。由圖 3-3-3(b)可以看到砂箱實驗與數值模擬中剪切帶對下盤的影響寬度結果接近，在$\Delta H/H = 5\%$以前，有生長地層的剪切帶對下盤影響較大，但$\Delta H/H$超過 5%之後的差異就不大了，W_F/H_1約在 0.6~0.7 之間。



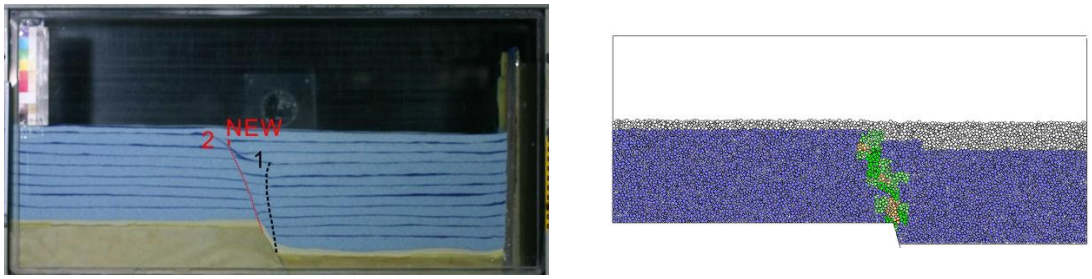
(a)ΔH/H = 6%



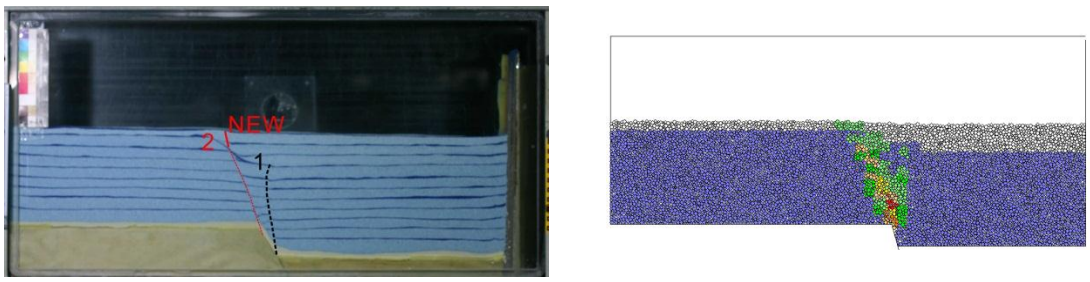
(b)ΔH/H = 10%



(c)重新鋪設砂土層ΔH/H = 0%

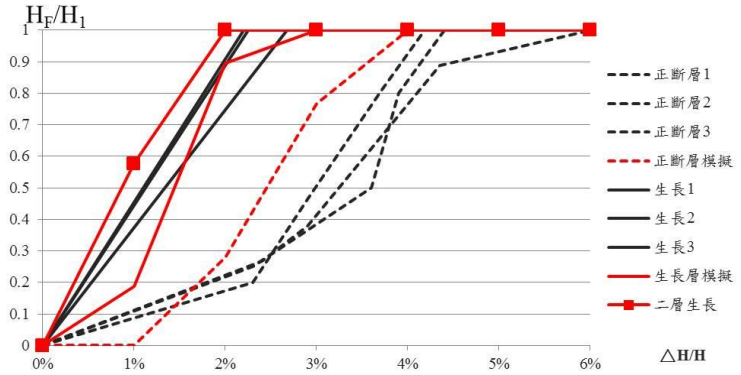


(d)ΔH/H = 2%

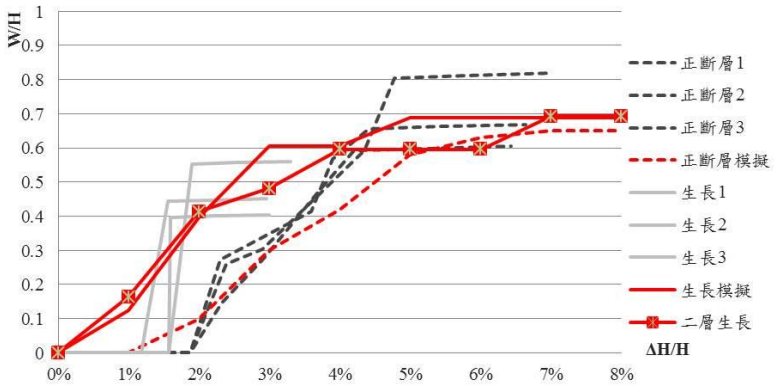


(e)ΔH/H = 3%

圖 3-3-2 砂箱實驗與數值模擬結果之定性比較



(a)



(b)

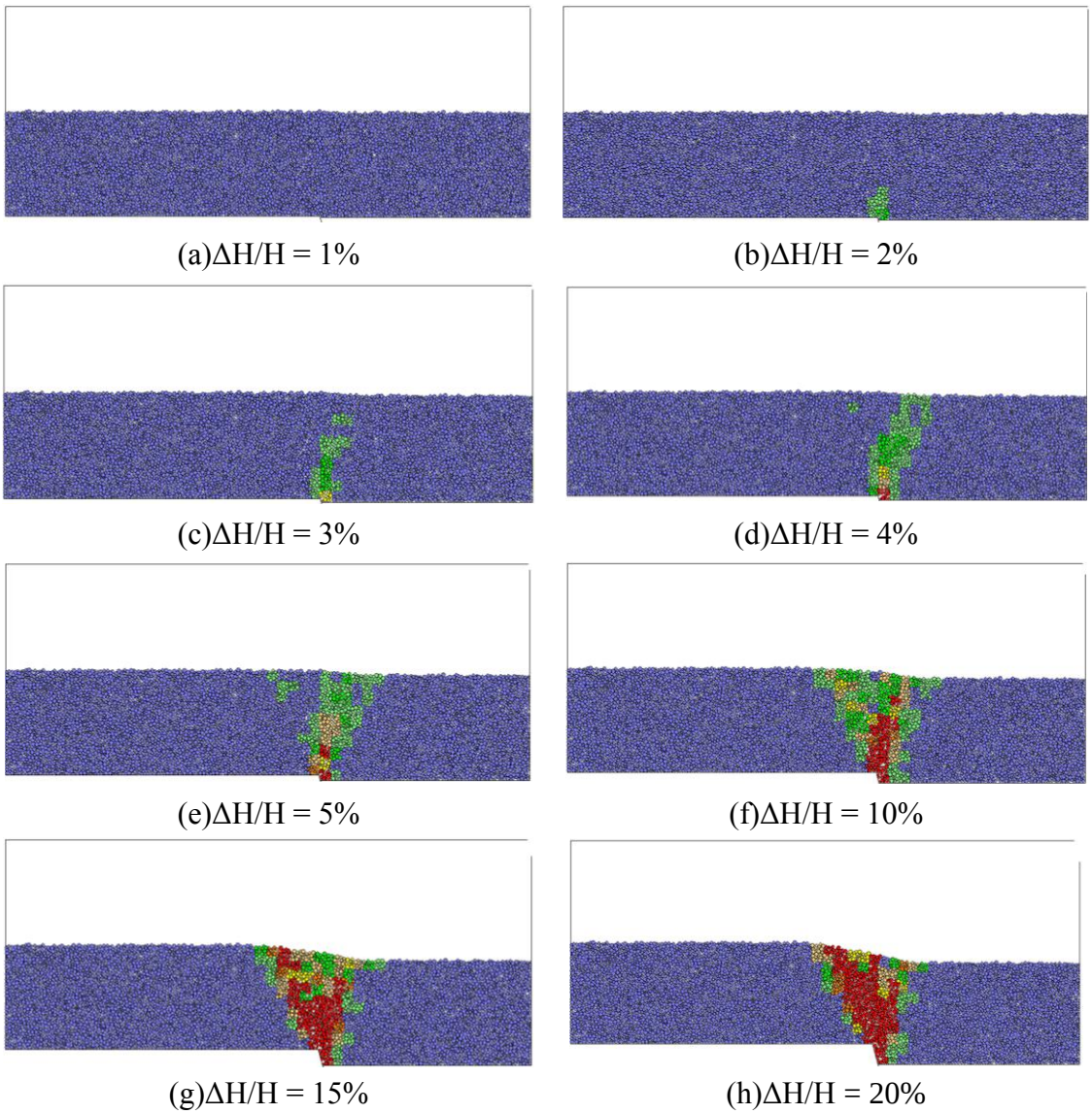
圖 3-3-3 砂箱實驗與數值模擬結果之定量比較

ii. 正斷層模擬

圖 3-3-4 至圖 3-3-6 分別代表覆土層厚度 20cm、30cm、40cm 之模擬結果，由圖 3-3-4 可以看到剪切帶是由岩盤破裂尖端處開始發展，並向地表延伸，擴張至地表後在地表處持續加寬，最終形成一個三角形的剪切帶。由圖 3-3-5 及圖 3-3-6 中可以看到當土層加厚，而其他邊界條件沒有改變時，剪切帶會同時由地表往下發展及由岩盤破裂尖端往上發展，最終在土層中間連成在一起，而由地表開始發展的剪切帶除了向地底發展之外，也在地表處快速加寬，以致於最終發展成一個有點類似「T」字形的剪切帶。

圖 3-3-7 至圖 3-3-10 分別代表斷層傾角30°、45°、60°、75°之結果，可以看到剪切帶的傾角會比斷層傾角更陡，這樣的情況在斷層傾角越小時越明顯。圖 3-3-11 將這四種不同傾角之斷層模擬所模擬出來的剪切帶對上、下盤的影響繪製成一張趨勢圖以供比對，從圖 3-3-11 的比較結果可以看到，當正斷層的傾角越小時，其剪切帶越寬，對下盤影響範圍大，

也越提早發展出反向斷層，並且反向斷層的影響範圍也越遠，對上盤影響範圍也越大。相反過來，當正斷層的傾角越大時，其剪切帶越集中，對上下盤的影響範圍都越小。另外，當正斷層傾角越小時，剪切帶越快發展到地表。如果更仔細的觀察從斷層傾角30°的結果(圖3-3-7)，可以看到原斷層及反向斷層兩條剪切帶中間的覆土層較兩側的覆土層低，形成一個地塹的形貌，這樣的現象在斷層傾角變大時相對的變不明顯。



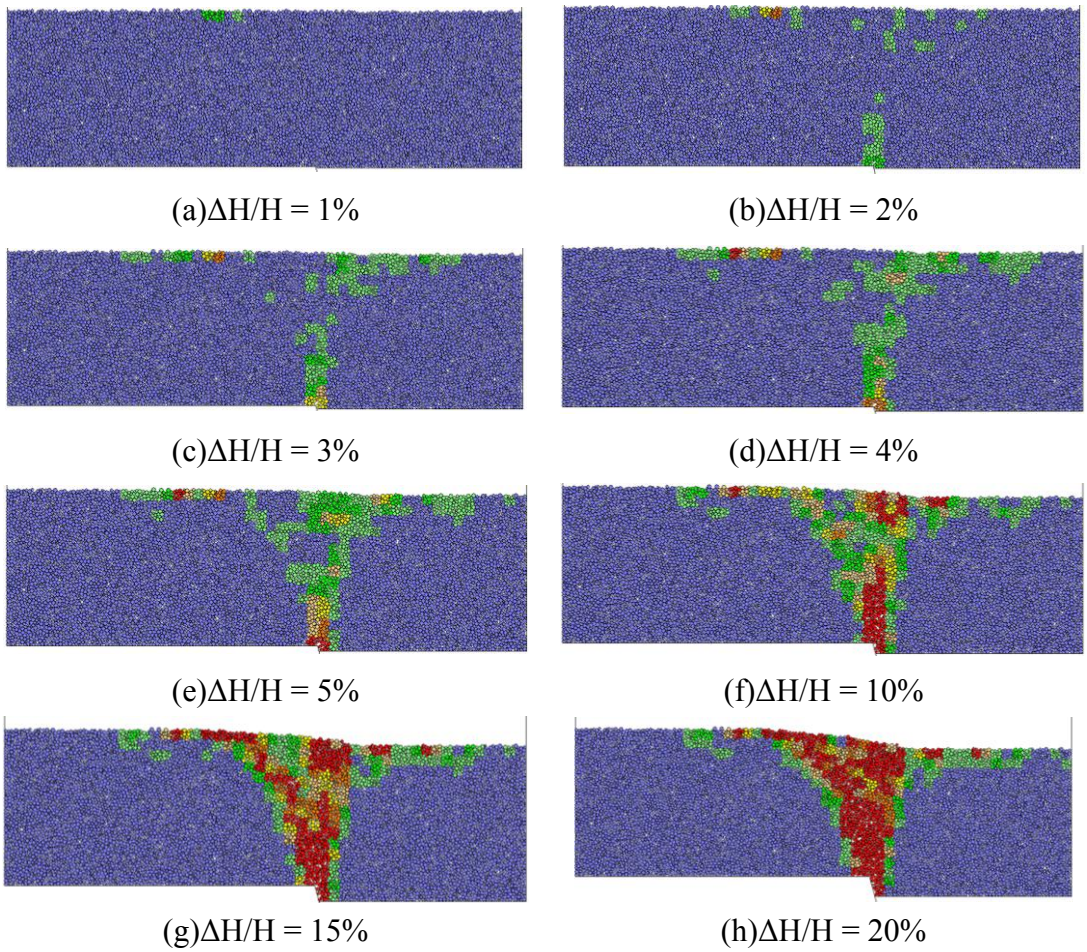
(a)ΔH/H = 1%　(b)ΔH/H = 2%

(c)ΔH/H = 3%　(d)ΔH/H = 4%

(e)ΔH/H = 5%　(f)ΔH/H = 10%

(g)ΔH/H = 15%　(h)ΔH/H = 20%

圖 3-3-4 覆土層厚度 20cm 之正斷層模擬結果



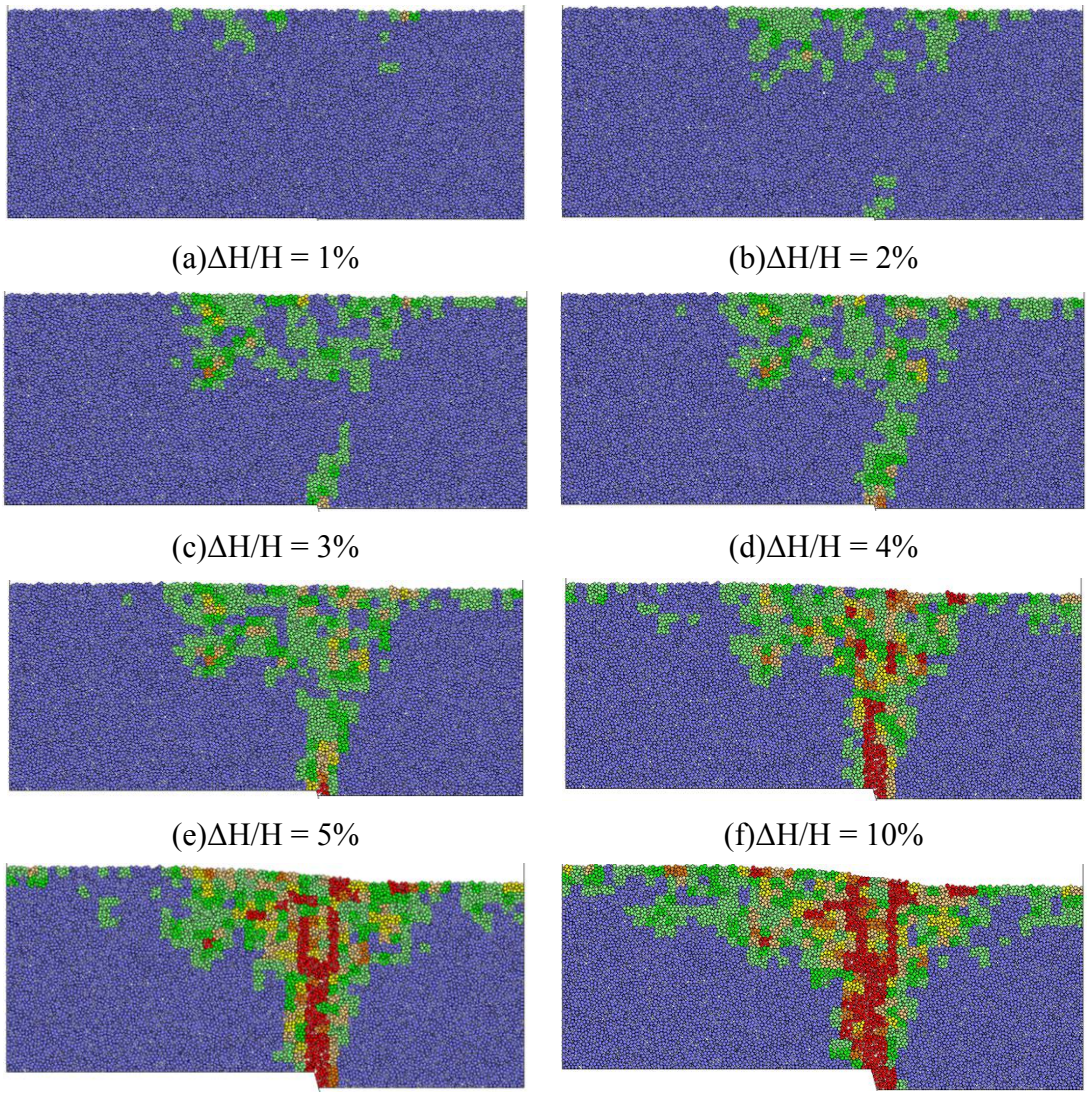
(a)ΔH/H = 1%　(b)ΔH/H = 2%

(c)ΔH/H = 3%　(d)ΔH/H = 4%

(e)ΔH/H = 5%　(f)ΔH/H = 10%

(g)ΔH/H = 15%　(h)ΔH/H = 20%

圖 3-3-5 覆土層厚度 30cm 之正斷層模擬結果



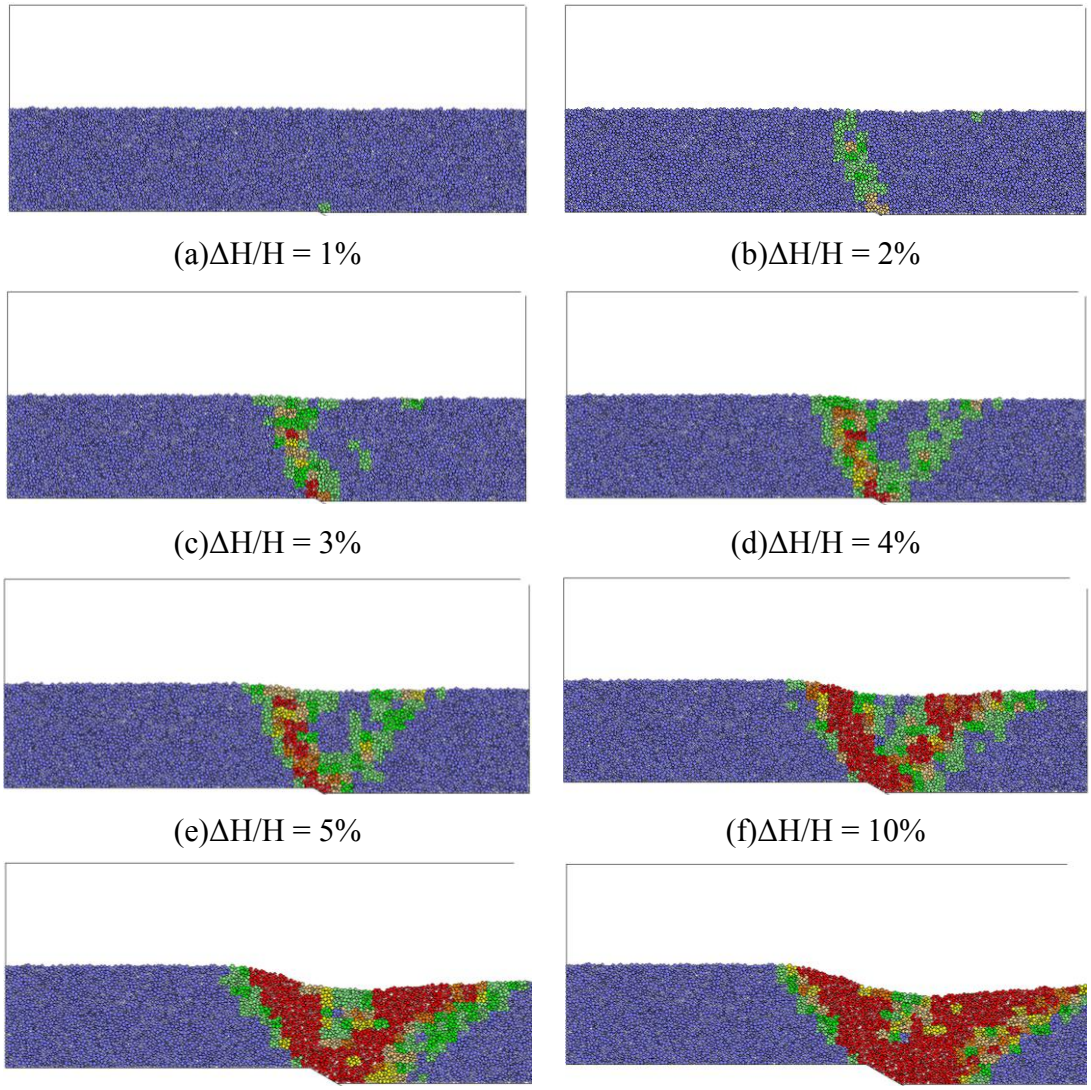
(a)ΔH/H = 1%　(b)ΔH/H = 2%

(c)ΔH/H = 3%　(d)ΔH/H = 4%

(e)ΔH/H = 5%　(f)ΔH/H = 10%

(g)ΔH/H = 15%　(h)ΔH/H = 20%

圖 3-3-6 覆土層厚度 40cm 之正斷層模擬結果



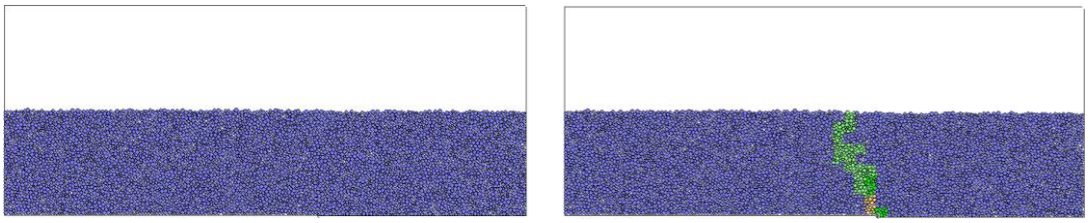
(a)ΔH/H = 1%　(b)ΔH/H = 2%

(c)ΔH/H = 3%　(d)ΔH/H = 4%

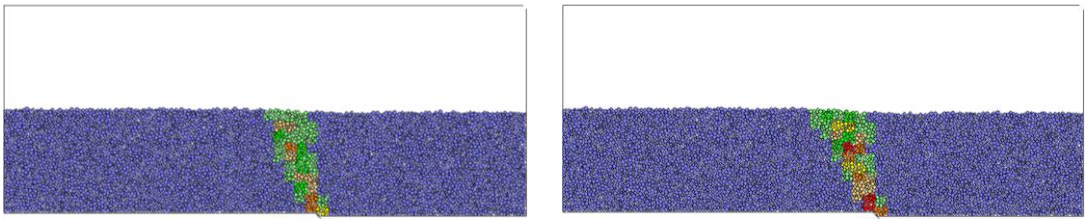
(e)ΔH/H = 5%　(f)ΔH/H = 10%

(g)ΔH/H = 15%　(h)ΔH/H = 20%

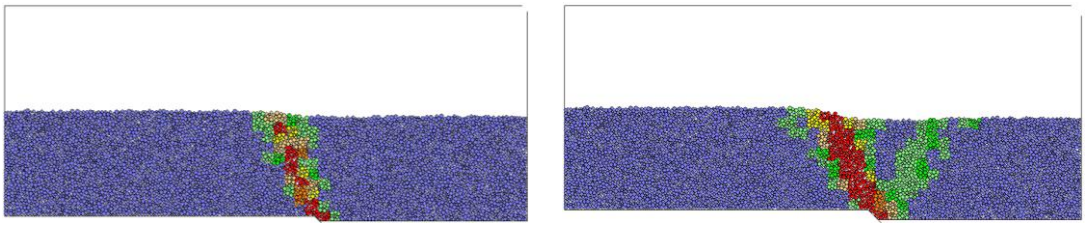
圖 3-3-7 斷層傾角 30^{o} 之正斷層模擬結果



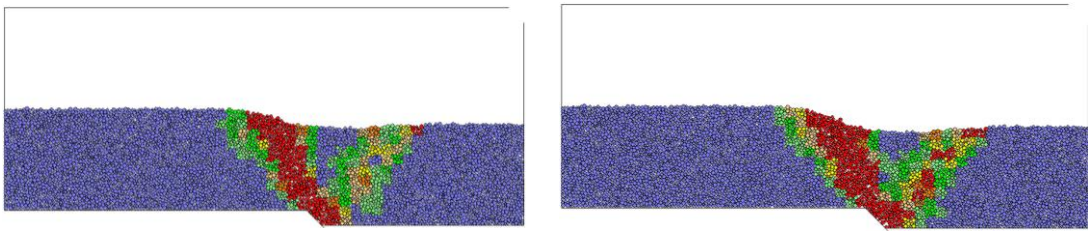
(a)ΔH/H = 1%　　(b)ΔH/H = 2%



(c)ΔH/H = 3%　　(d)ΔH/H = 4%

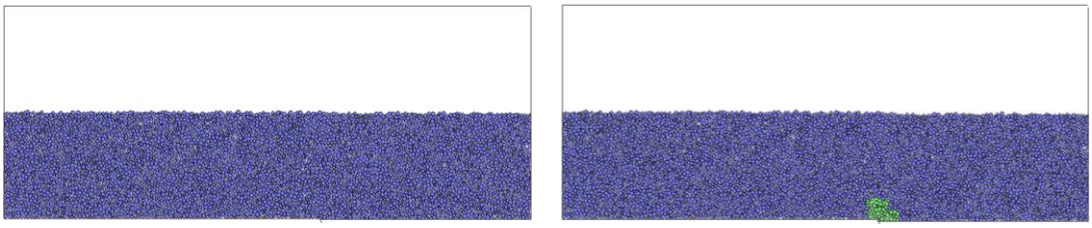


(e)ΔH/H = 5%　　(f)ΔH/H = 10%

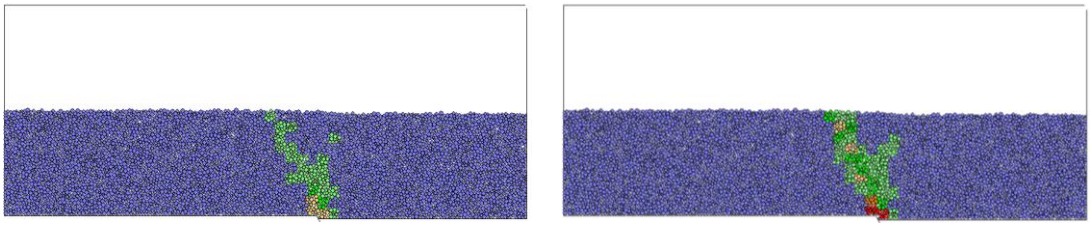


(g)ΔH/H = 15%　　(h)ΔH/H = 20%

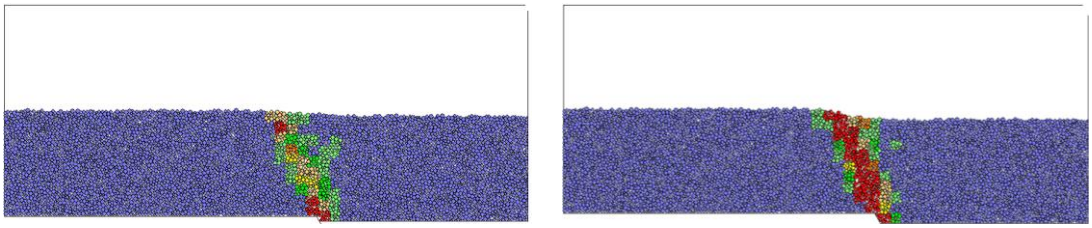
圖 3-3-8 斷層傾角 45^{o} 之正斷層模擬結果



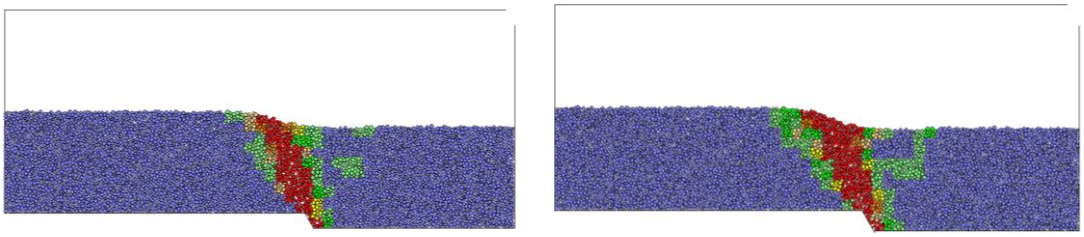
(a)ΔH/H = 1%　　(b)ΔH/H = 2%



(c)ΔH/H = 3%　　(d)ΔH/H = 4%

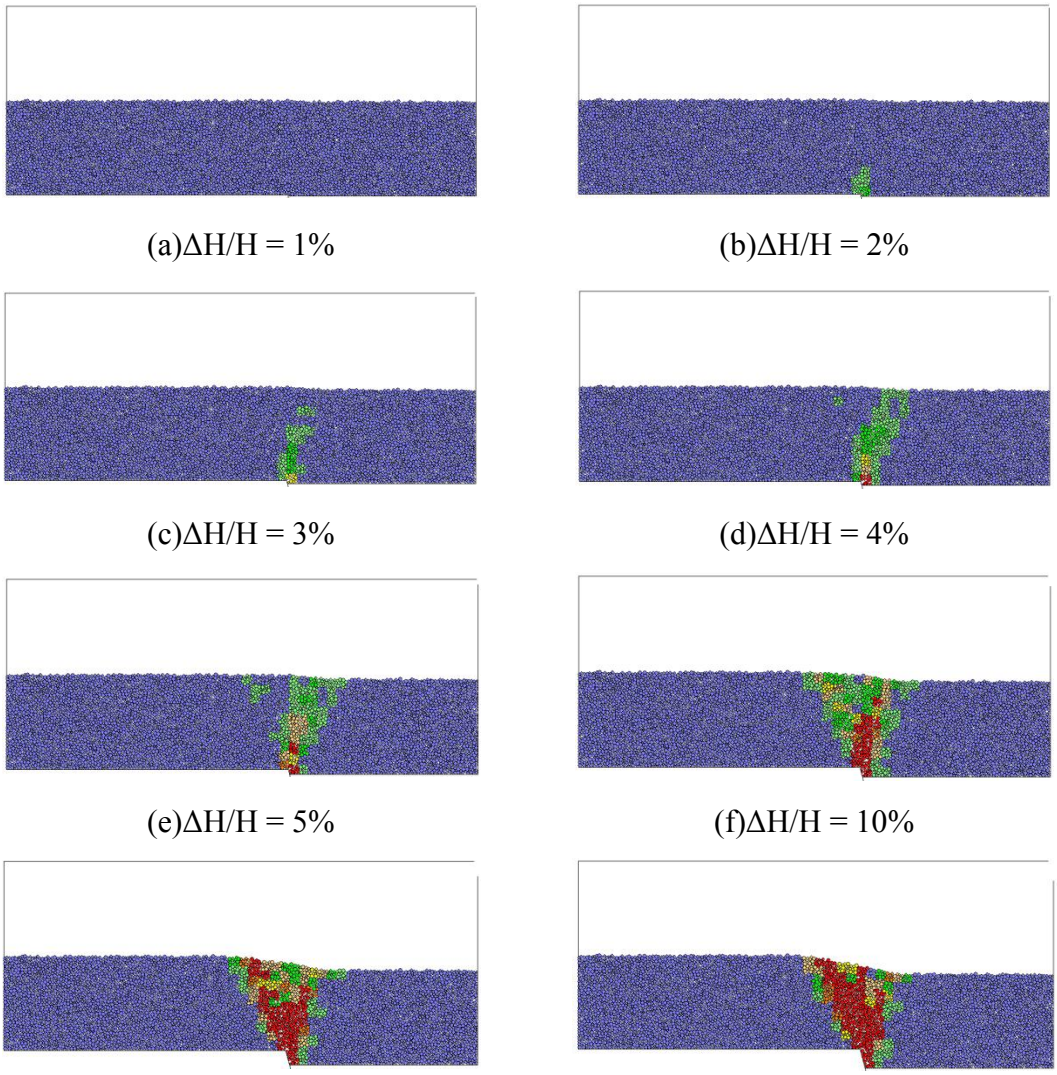


(e)ΔH/H = 5%　　(f)ΔH/H = 10%



(g)ΔH/H = 15%　　(h)ΔH/H = 20%

圖 3-3-9 斷層傾角 60^{o} 之正斷層模擬結果



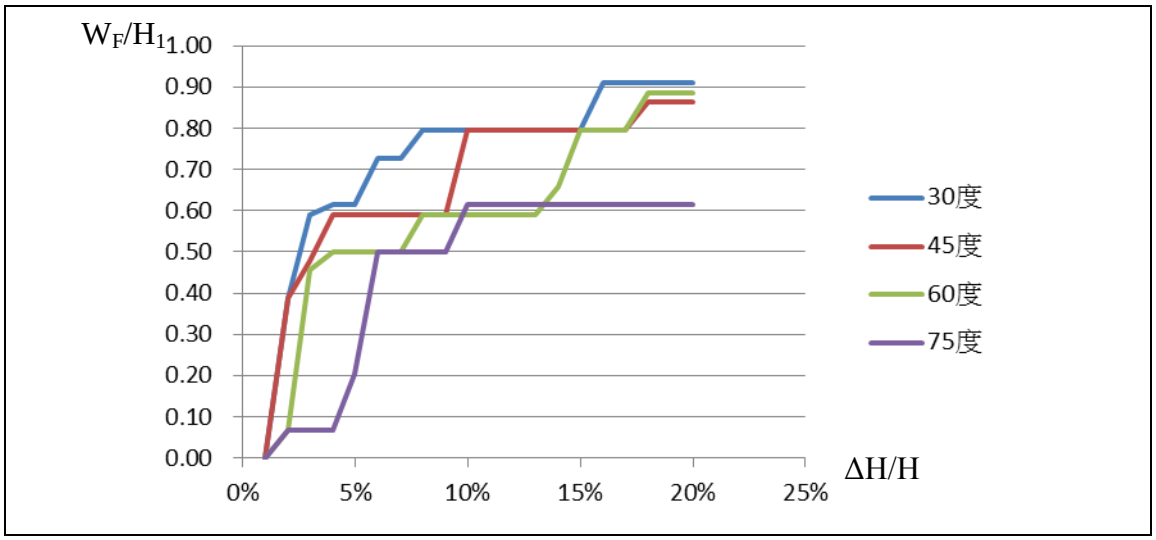
(a)ΔH/H = 1%　(b)ΔH/H = 2%

(c)ΔH/H = 3%　(d)ΔH/H = 4%

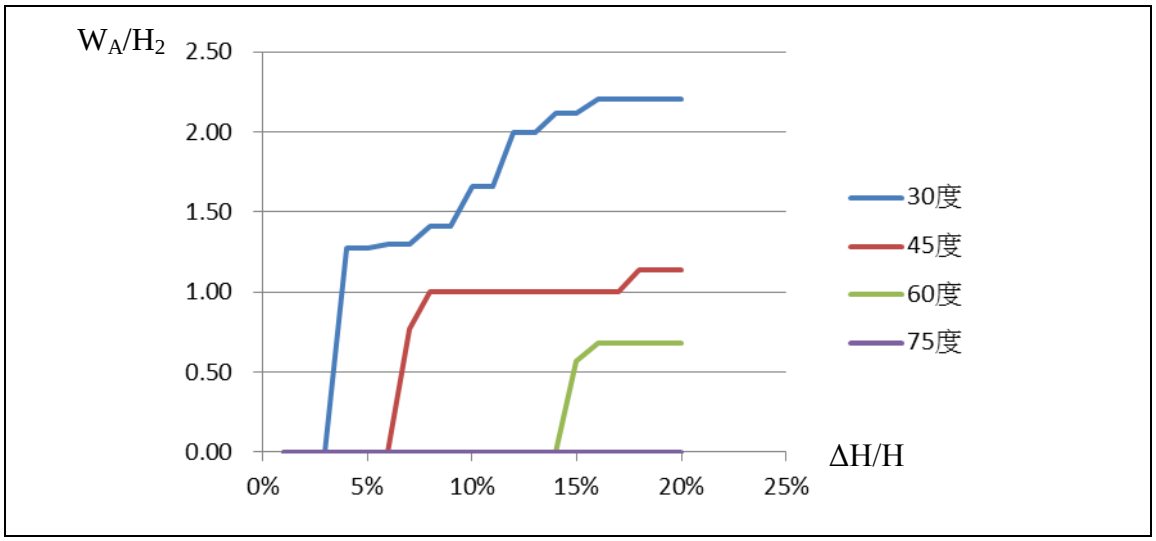
(e)ΔH/H = 5%　(f)ΔH/H = 10%

(g)ΔH/H = 15%　(h)ΔH/H = 20%

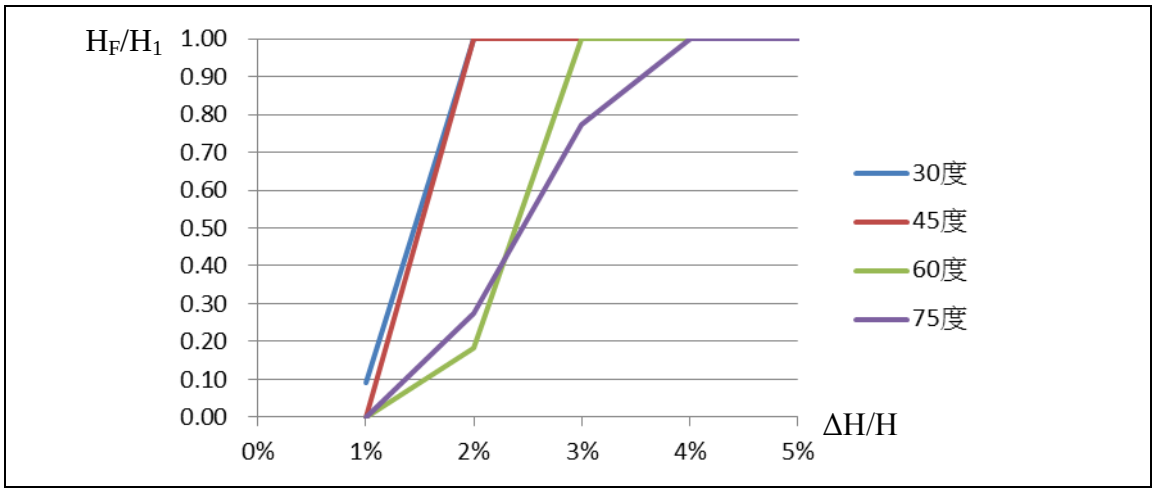
圖 3-3-10 斷層傾角 75^{o} 之正斷層模擬結果



(a) 剪切帶對下盤影響距離(W_F/H_1)之變化



(b) 反向斷層剪切帶影響距離(W_A/H_2)之變化



(c) 剪切帶發展高度(W_F/H_1)之變化

圖 3-3-11 斷層傾角變化對地表變形之影響

iii. 生長斷層模擬

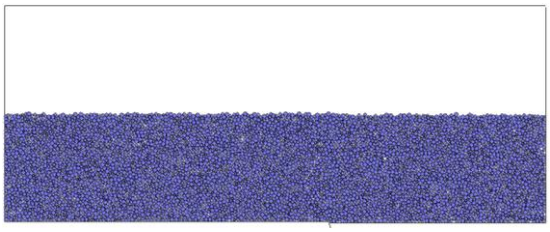
圖 3-3-12 至圖 3-3-15 分別代表還沒有生長層、一層生長層、二層生長層及三層生長層的模擬結果，由圖 3-3-12 可以看到，在還沒有生長層的時候，剪切帶先向上盤發展，當 ΔH/H 為 4%時剪切帶發展至地表，接著剪切帶範圍擴大，向下盤發展，直到 ΔH/H 達到 0.06 之後，剪切帶不再擴大，此時 W_F/H_1 與 W_H/H_2 維特在大約 0.6，但剪切帶內的剪應變量仍會持續增加。

由圖 3-3-13 可以看到，當有一層生長層時，剪切帶先向下盤發展，當 ΔH/H 為 3%時剪切帶發展至地表，接著 W_F/H_1 繼續增加，至 ΔH/H 達到 5%之後，維持在 0.6 左右，而 W_H/H_2 之增加則不明顯，一直維持在 0.2~0.3 之間，但即便剪切帶沒有再擴張，剪切帶內的剪應變量仍會持續增加。

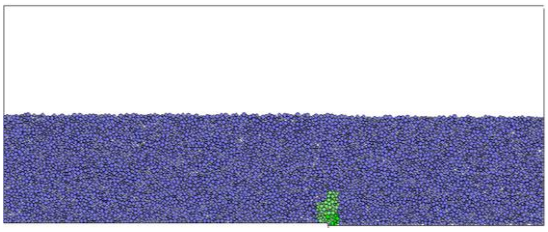
由圖 3-3-14 可以看到，當有二層生長層時，剪切帶先向下盤發展，當 ΔH/H 為 2%時剪切帶發展至地表，並且隨著基盤持續下陷，W_F/H_1 也持續增加，而 W_H/H_2 的增加則不明顯，一直維持在 0.2 左右，剪切帶內的剪應變量則是持續增加。另外，當 ΔH/H 達到 4%時，上盤的土層中出現反向斷層(Antithetic Fault)，其 W_A/H_2 約為 0.5~0.6。

由圖 3-3-15 可以看到，當有三層生長層時，剪切帶先向下盤發展，當 ΔH/H 為 3%時剪切帶發展至地表，剪隨著基盤持續下陷，W_F/H_1 明顯的持續增加，而 W_H/H_2 的增加則不明顯，一直維持在 0.2 左右，剪切帶內的剪應變量則是持續增加。另外，當 ΔH/H 達到 0.06 時，上盤的土層中出現反向斷層(Antithetic Fault)，並持續發展至地表，發展至地表時，W_A/H_2 約為 0.75。

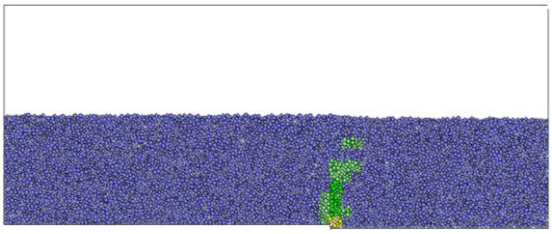
為了更清楚看到生長層對剪切帶展之影響，圖 3-3-16 至圖 3-3-19 之結果乃是將以上四組的結果合在一起比對，由圖 3-3-16 可以看到，當有生長層時，其剪切帶發展至地表之速度會比單一土層時來得快，大約是單一土層的 1/2 倍。由圖 3-3-17 可以看到，當生長層越多層時，剪切帶對下盤的影響會越大，由圖 3-3-18 及圖 3-3-19 可以看到，唯有覆土層為單一土層時，剪切帶會先向上盤發展，並且也可以看到當生長層越多層時，反向斷層的剪切帶對上盤土層影響越大。



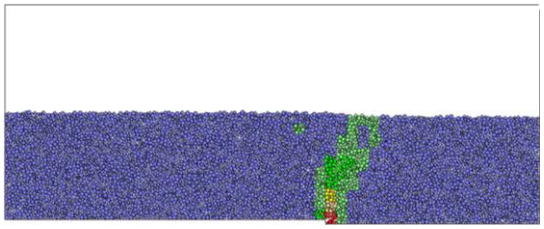
(a)ΔH/H = 1%



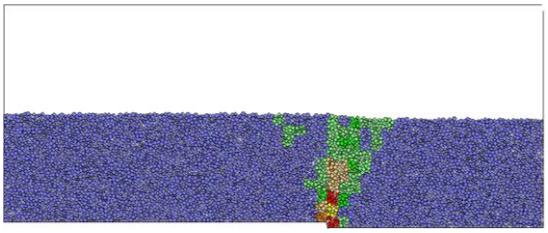
(b)ΔH/H = 2%



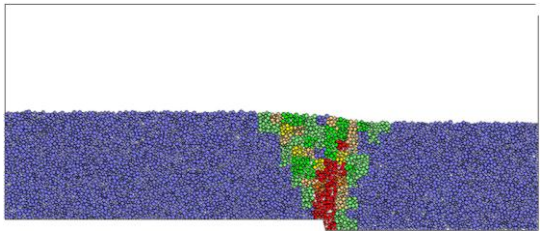
(c)ΔH/H = 3%



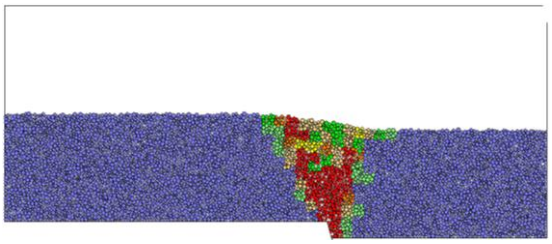
(d)ΔH/H = 4%



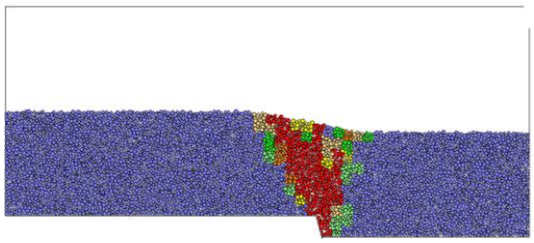
(e)ΔH/H = 5%



(f)ΔH/H = 10%



(g)ΔH/H = 15%



(h)ΔH/H = 20%

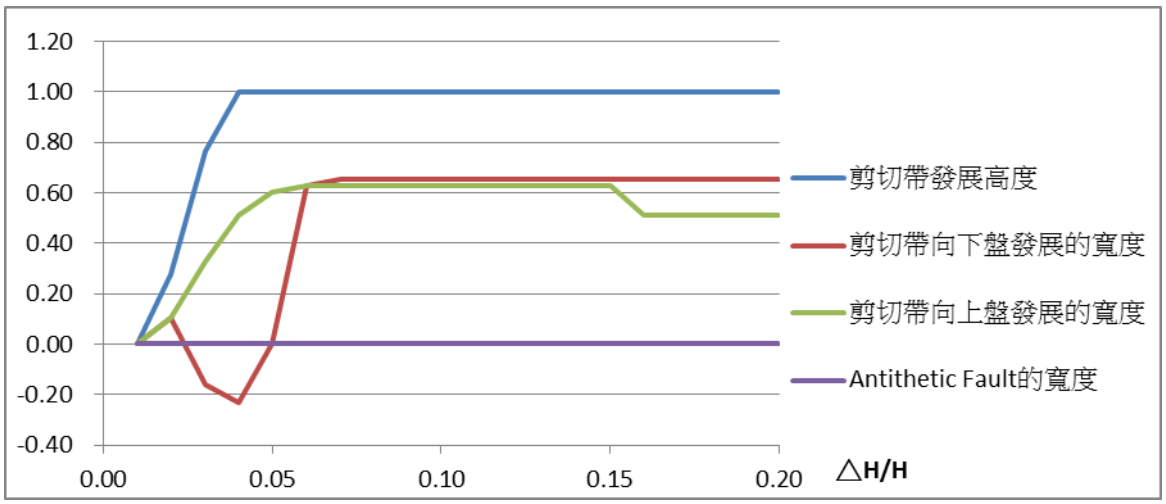
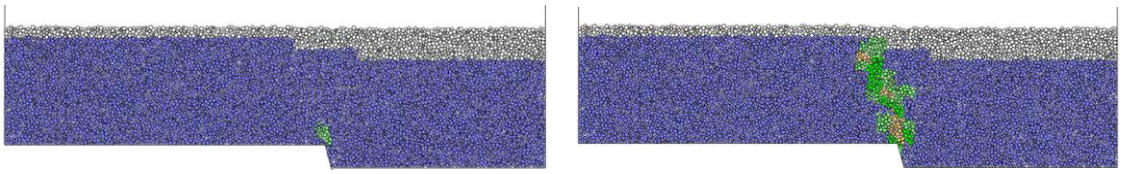
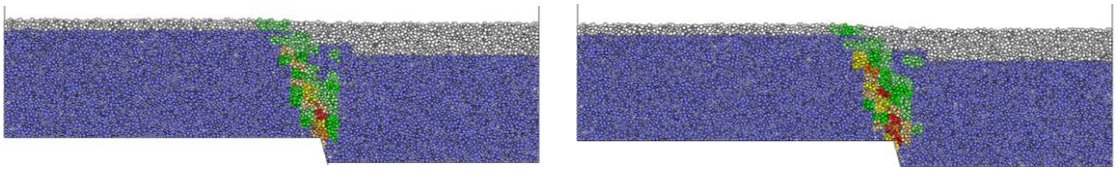


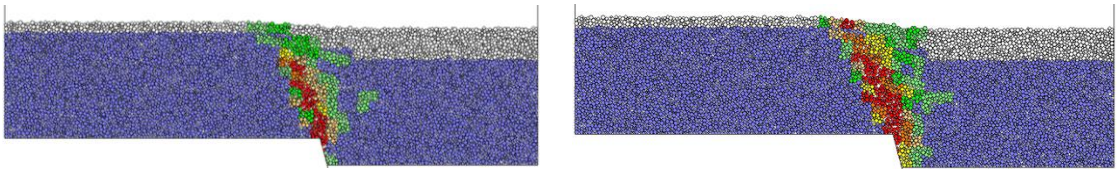
圖 3-3-12 斷層傾角 75^{o} 之正斷層模擬結果



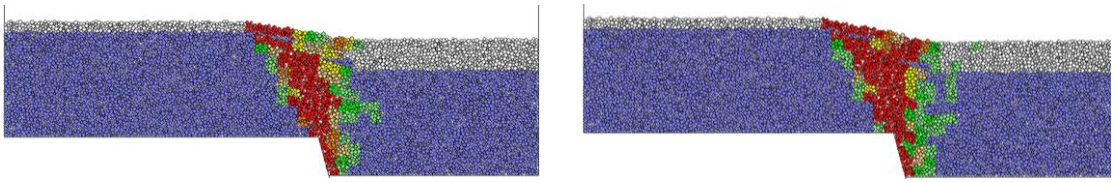
(a)ΔH/H = 1%　　(b)ΔH/H = 2%



(c)ΔH/H = 3%　　(d)ΔH/H = 4%



(e)ΔH/H = 5%　　(f)ΔH/H = 10%



(g)ΔH/H = 15%　　(h)ΔH/H = 20%

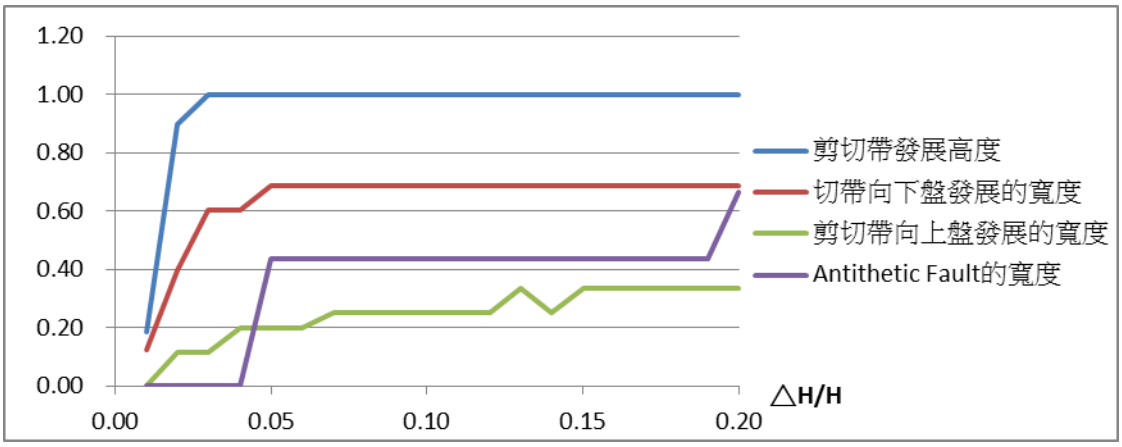
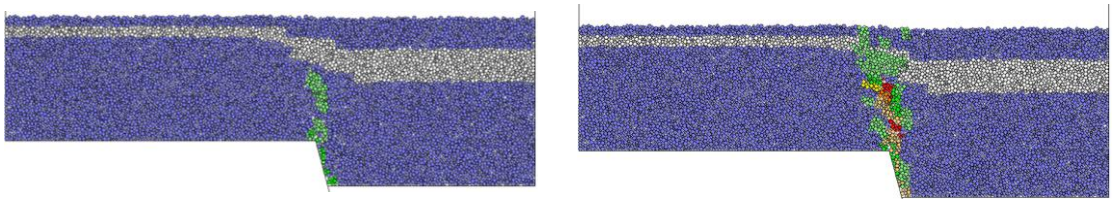
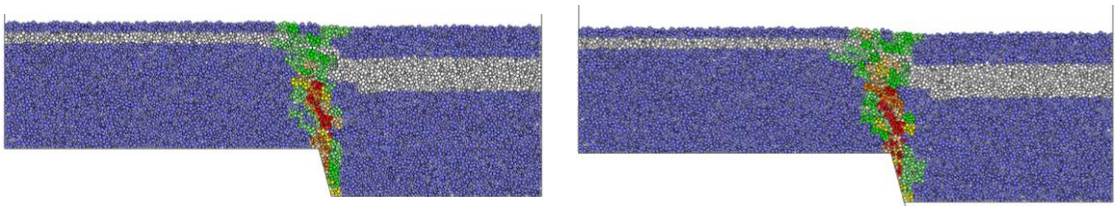


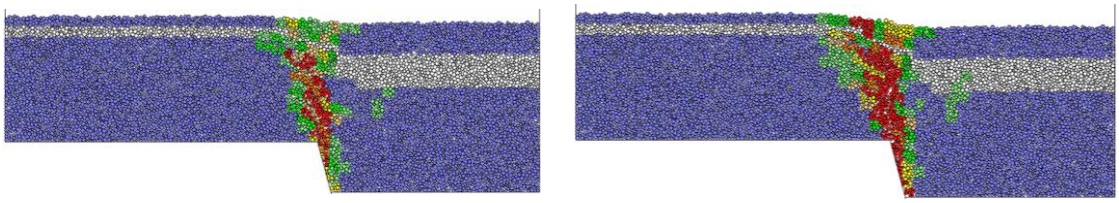
圖 3-3-13 斷層傾角 75^{o}，一層生長層之正斷層模擬結果



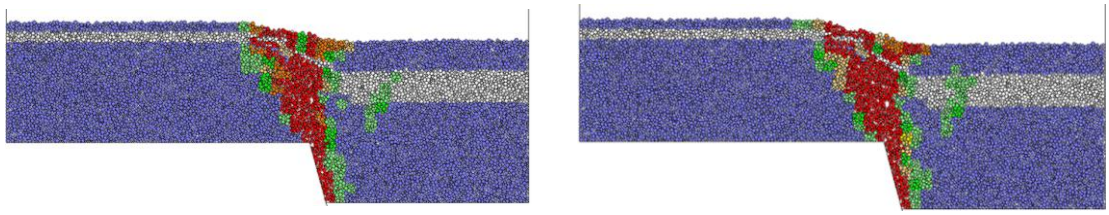
(a)ΔH/H = 1%　　(b)ΔH/H = 2%



(c)ΔH/H = 3%　　(d)ΔH/H = 4%



(e)ΔH/H = 5%　　(f)ΔH/H = 10%



(g)ΔH/H = 15%　　(h)ΔH/H = 20%

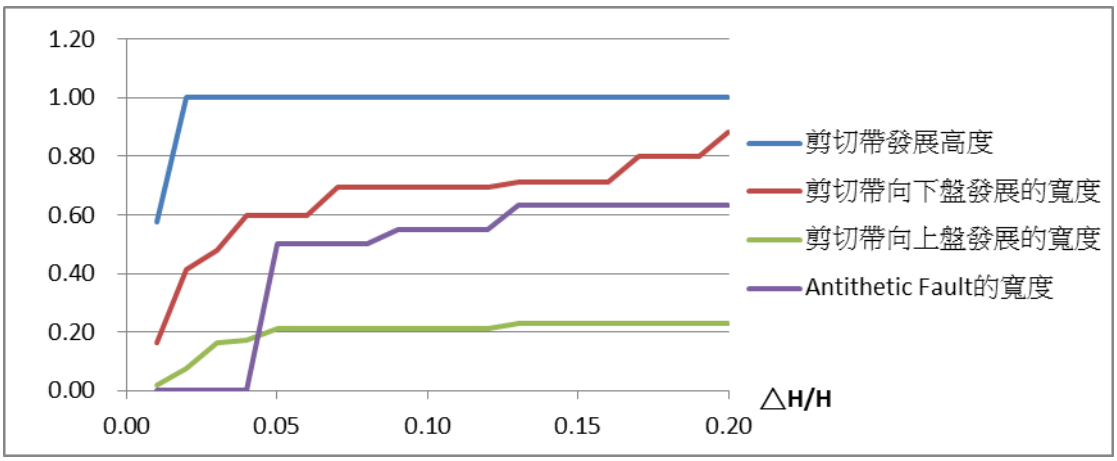
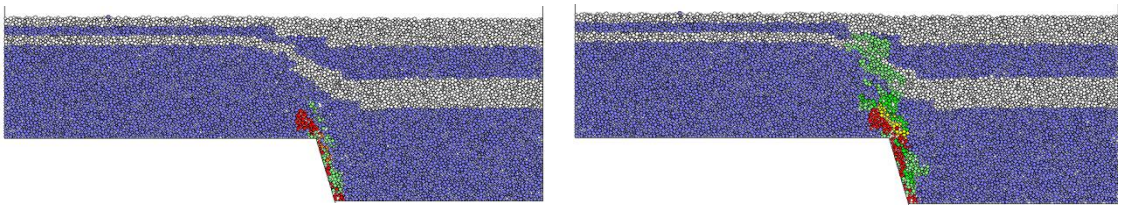
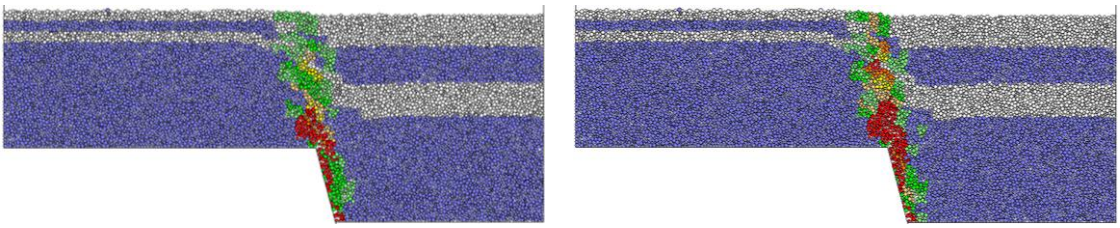


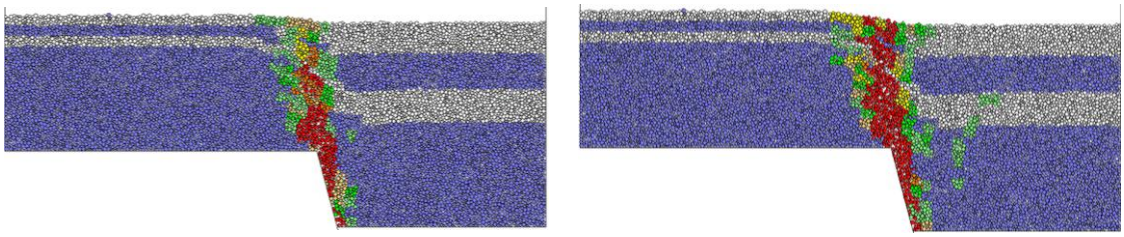
圖 3-3-14 斷層傾角 75^{o}，二層生長層之正斷層模擬結果



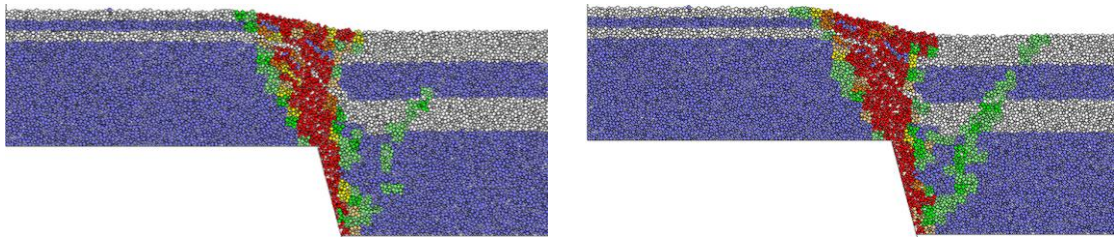
(a)ΔH/H = 1%　　(b)ΔH/H = 2%



(c)ΔH/H = 3%　　(d)ΔH/H = 4%



(e)ΔH/H = 5%　　(f)ΔH/H = 10%



(g)ΔH/H = 15%　　(h)ΔH/H = 20%

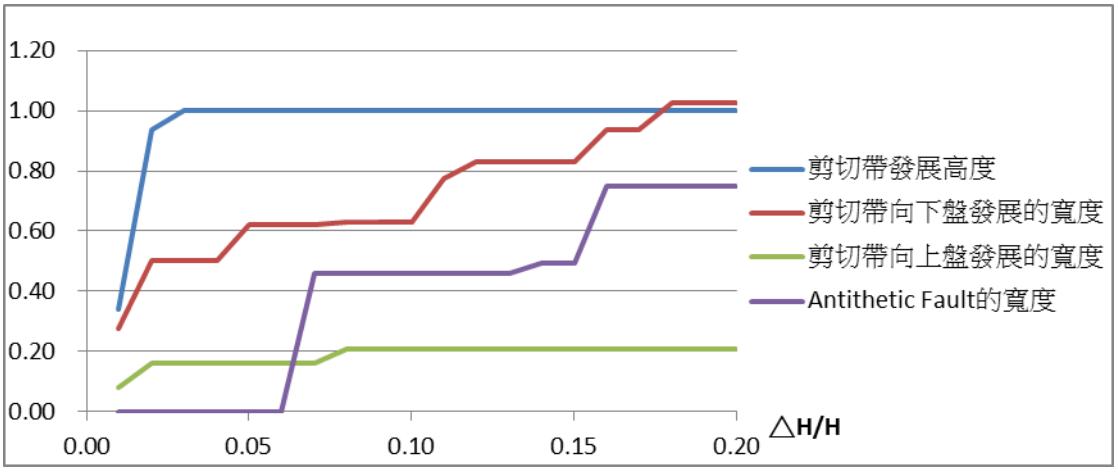


圖 3-3-15 斷層傾角 75^{o}，三層生長層之正斷層模擬結果

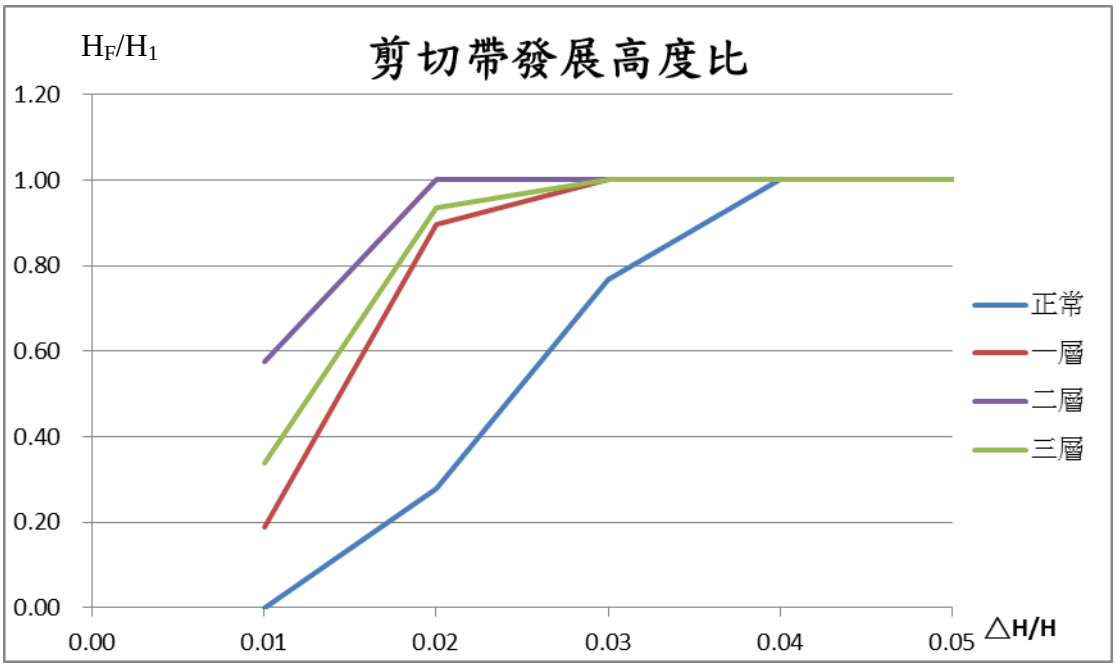


圖 3-3-16 生長層對剪切帶發展高度比之影響

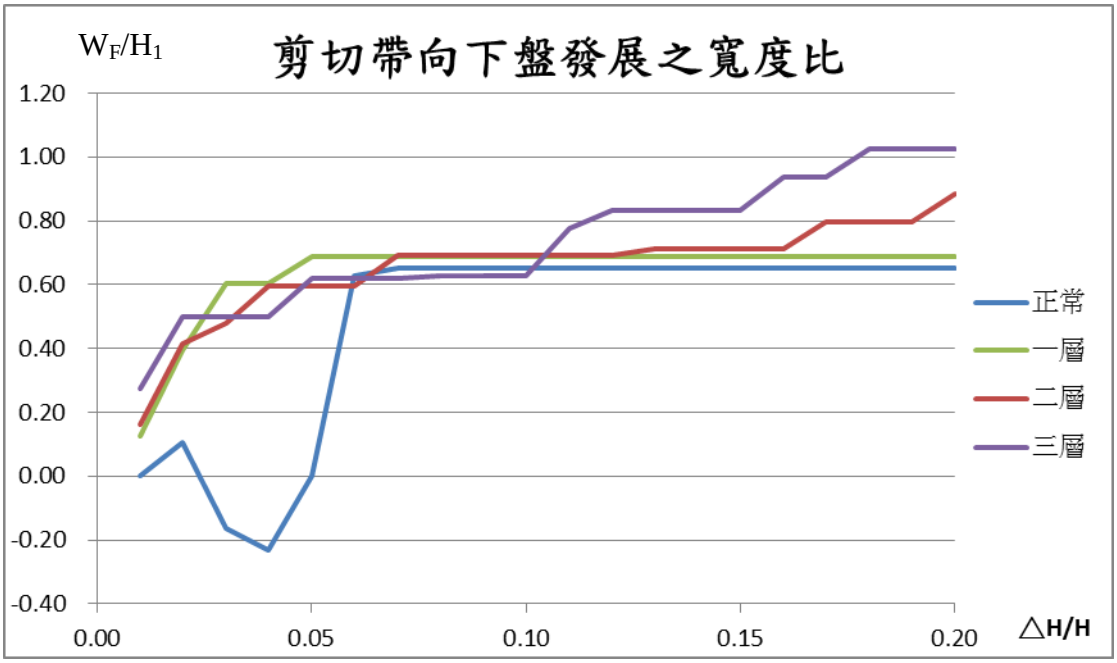


圖 3-3-17 生長層對剪切帶向下盤發展之寬度比之影響

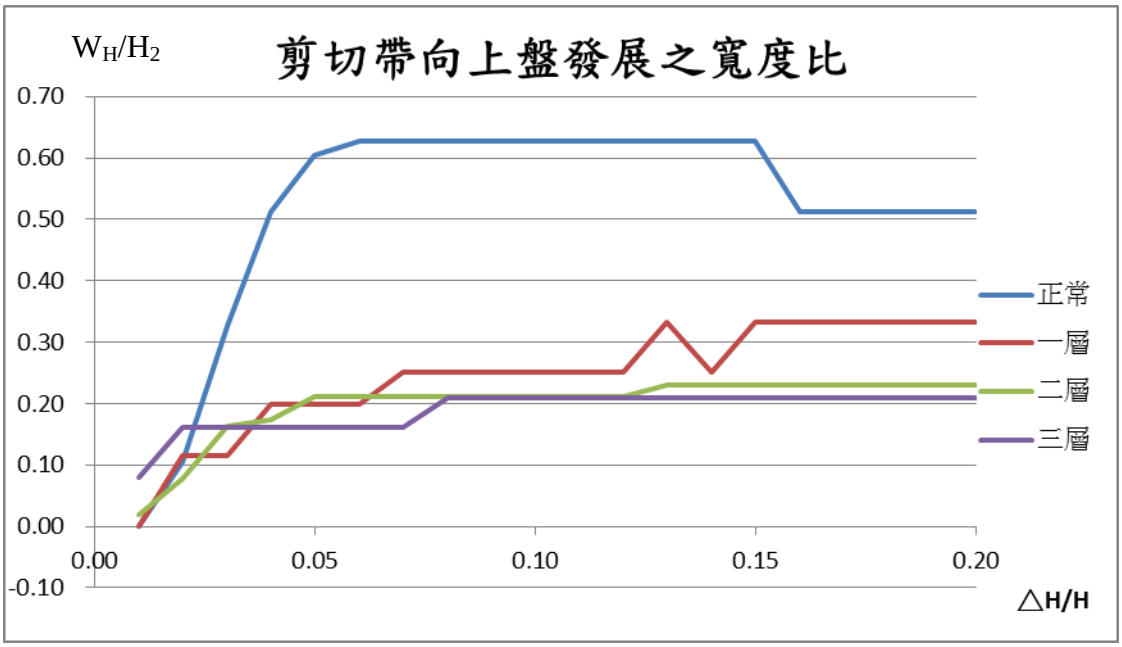


圖 3-3-18 生長層對剪切帶向上盤發展之寬度比之影響

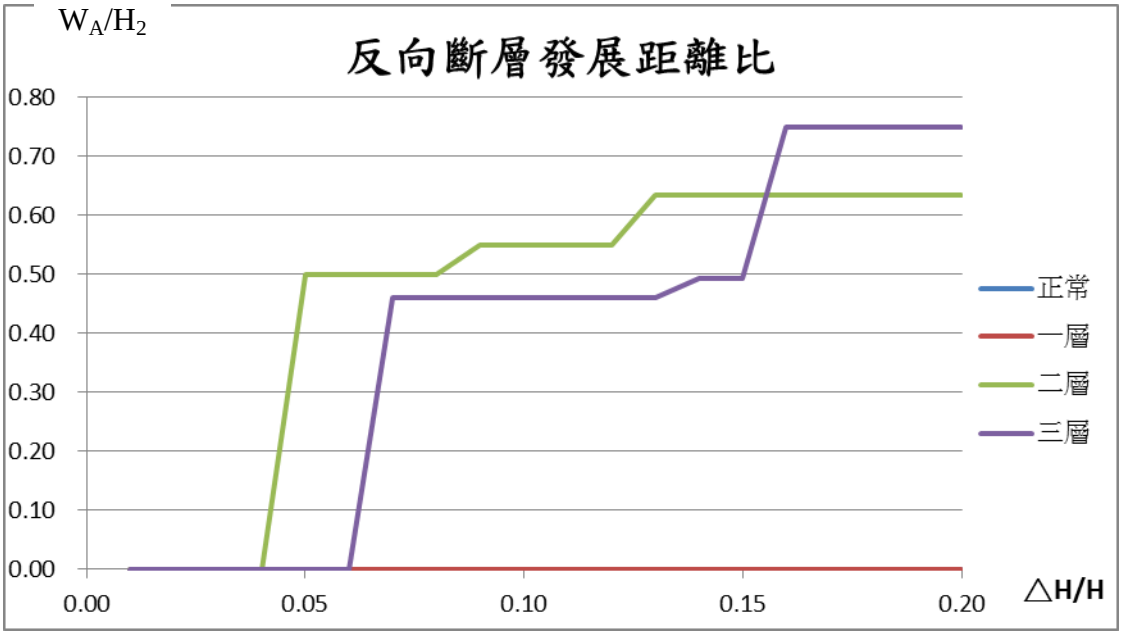


圖 3-3-19 生長層對反向斷層發展距離比之影響

iv. 剪切帶受結構物影響

如圖 3-3-20 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^*，而地表結構物之均布載重為 q，本研究分別進行了 x^*為 0.5B、1.0B、1.5B、2.0B 四組實驗，這四組實驗中，又各自針對 q 為 0.4γH、0.5γH、0.6γH 三種條件進行模擬，以了解補強結構物的原則。圖 3-3-21 顯示當 x^*為 0.5B 時，剪切帶從基礎左側開始發展，隨著斷錯動剪切帶變寬，當$\Delta H/H = 20\%$時剪應變最大的地方集中在基盤延伸到基礎左側之剪切帶及基礎右側下方；圖 3-3-22 顯示結構物變重時剪切帶有略有變小，且結構物的旋轉角度變小。圖 3-3-23 顯示當 x^*為 1.0B 時，剪切帶從基礎的右側開始發展，隨著斷錯動剪切帶變寬，基礎左側之剪應變增加較快，當$\Delta H/H = 20\%$時剪應變最大的地方集中在基盤延伸到基礎左側之剪切帶及基礎右側下方；圖 3-3-24 顯示結構物變重時剪切帶有略有變小，且結構物的旋轉角度變小。圖 3-3-25 顯示當 x^*為 1.5B 時，剪切帶從基礎右側開始發展，$\Delta H/H = 10\%$時可以在基礎右側下方看到明顯的張裂縫，此時結構物尚未傾斜，當$\Delta H/H = 20\%$時，結構物下方的砂土開始滾動，剪切帶才發展到結構物下方；圖 3-3-26 顯示結構物變重時剪切帶有略有變大，但結構物的旋轉角度不變。圖 3-3-27 顯示當 x^*為 2.0B 時，結構物與剪切帶沒有明顯的相互影響；而圖 3-3-28 顯示結構物變重時剪切帶有略有變大，在結構物的右側基角下出現剪切帶，且當 q=0.6γH 時結構物的旋轉角度變大。

由以上成果及圖 3-3-29 綜合來看，可以看到當結構物與正斷層基盤破裂距離小於等於 1.0B 時，受到剪切帶的影響比較大，但是可以透過增加結構物的荷重來改善它受影響的程度。而當結構物與正斷層基盤破裂距離大於等於 1.5B 時，結構物不太會受剪切帶影響，但隨著結構物荷重增加，下盤邊坡的側向土壓變大，剪切帶也會變向下盤擴張。

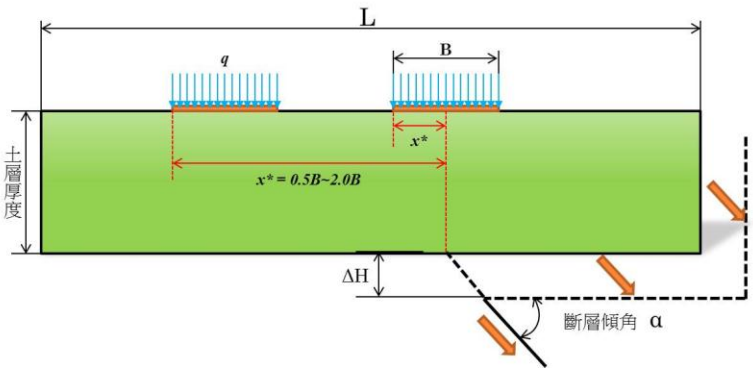
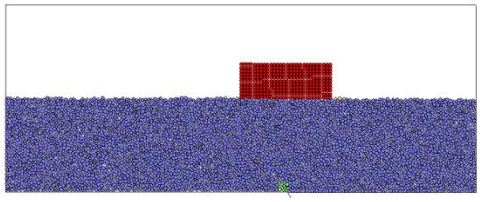
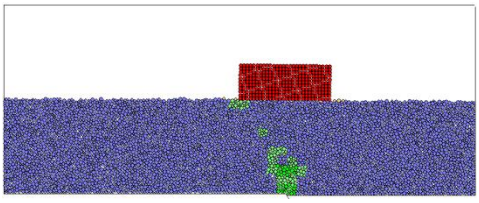


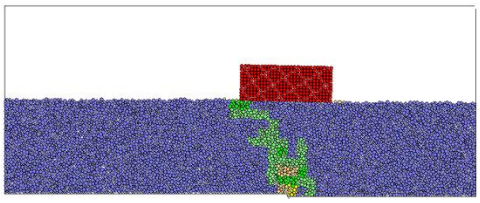
圖 3-3-20 地表結構物對斷層帶發展範圍之影響數值模擬尺寸示意圖



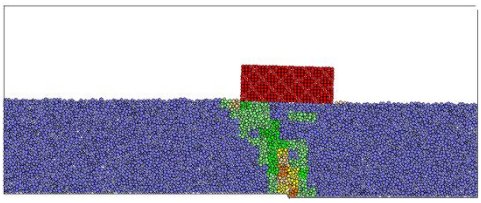
(a)ΔH/H = 1%



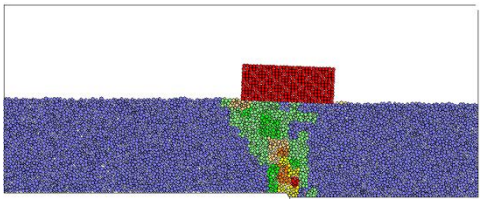
(b)ΔH/H = 2%



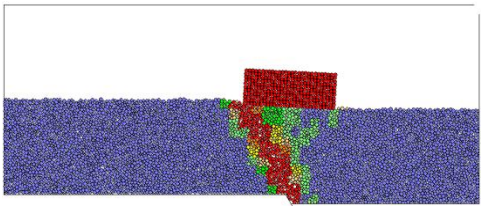
(c)ΔH/H = 3%



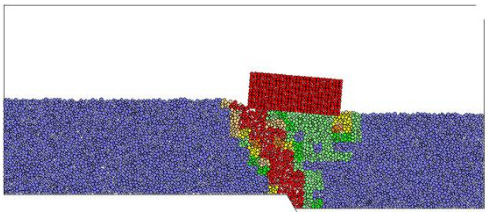
(d)ΔH/H = 4%



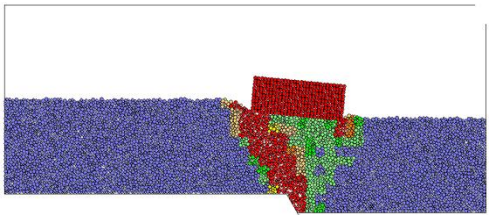
(e)ΔH/H = 5%



(f)ΔH/H = 10%

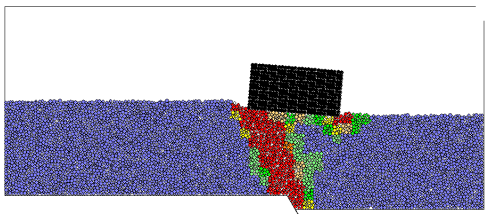


(g)ΔH/H = 15%

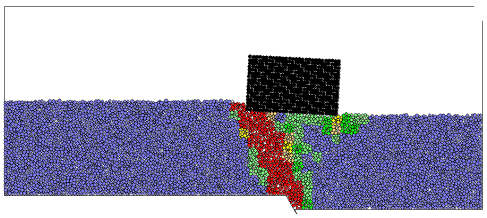


(h)ΔH/H = 20%

圖 3-3-21 剪切帶受結構物影響模擬結果(X*=0.5B)

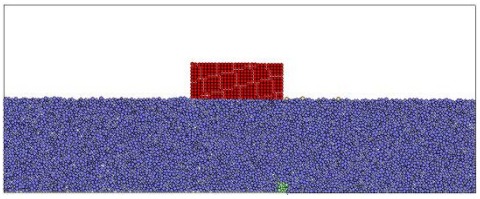


(a)q = 0.5γH

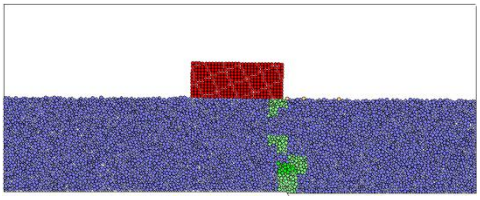


(b) q = 0.6γH

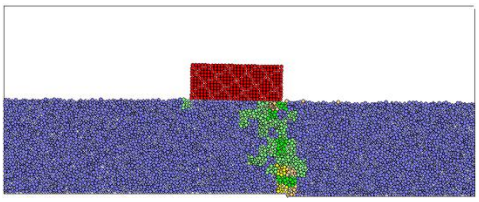
圖 3-3-22 X*=0.5B 時不同重量的結構物受影響之差別



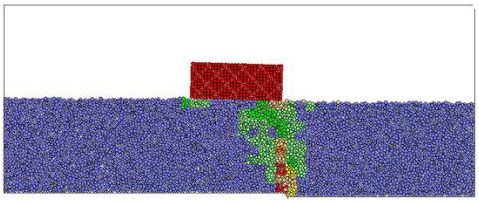
(a)ΔH/H = 1%



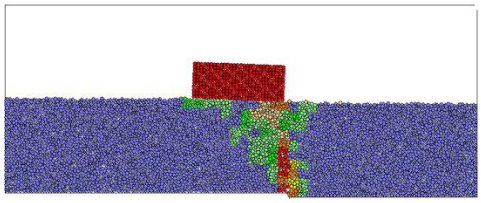
(b)ΔH/H = 2%



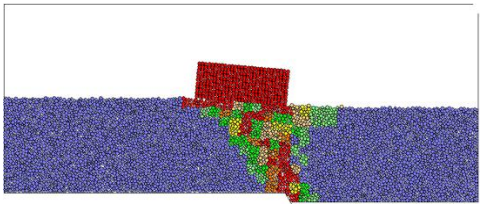
(c)ΔH/H = 3%



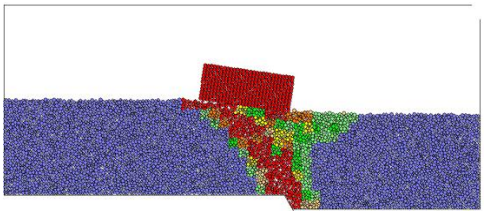
(d)ΔH/H = 4%



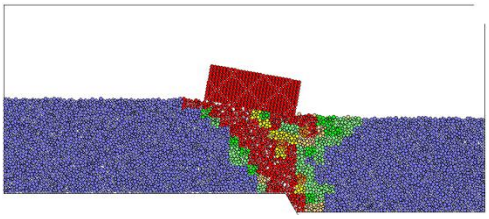
(e)ΔH/H = 5%



(f)ΔH/H = 10%

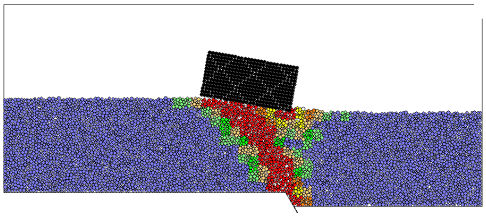


(g)ΔH/H = 15%

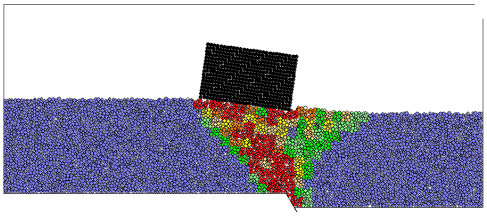


(h)ΔH/H = 20%

圖 3-3-23 剪切帶受結構物影響模擬結果(X*=1.0B)

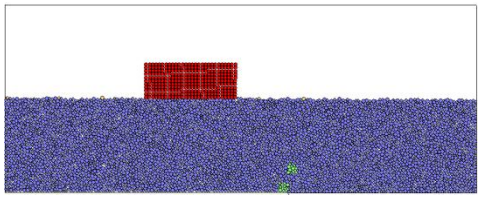


(a) q = 0.5γH

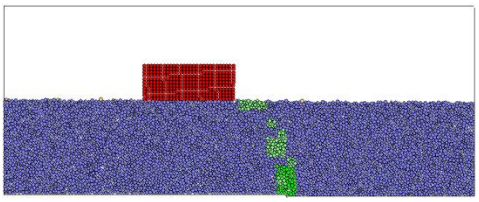


(b) q = 0.6γH

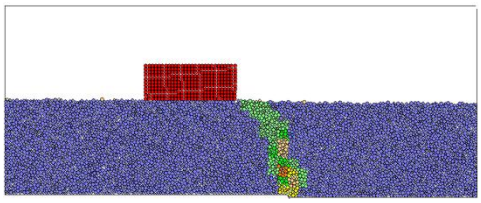
圖 3-3-24 X*=1.0B 時不同重量的結構物受影響之差別



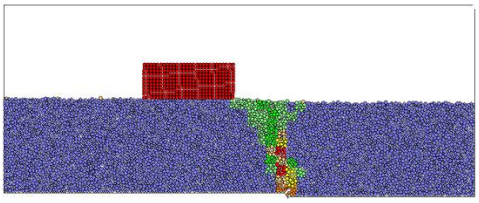
(a)ΔH/H = 1%



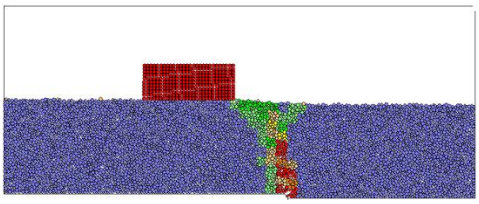
(b)ΔH/H = 2%



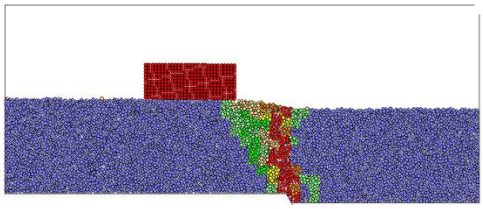
(c)ΔH/H = 3%



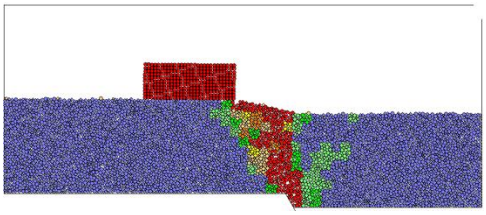
(d)ΔH/H = 4%



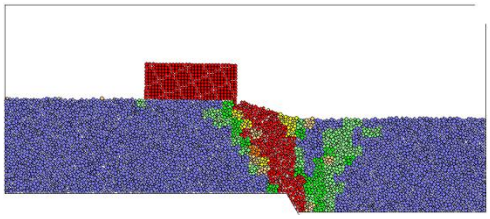
(e)ΔH/H = 5%



(f)ΔH/H = 10%

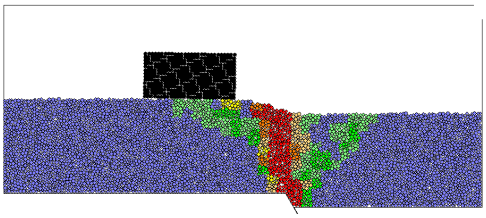


(g)ΔH/H = 15%

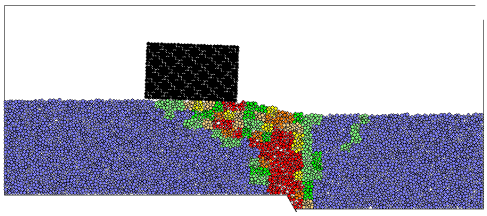


(h)ΔH/H = 20%

圖 3-3-25 剪切帶受結構物影響模擬結果(X*=1.5B)

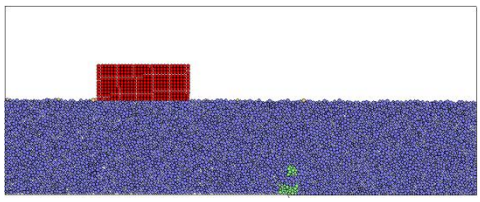


(a)q = 0.5γH

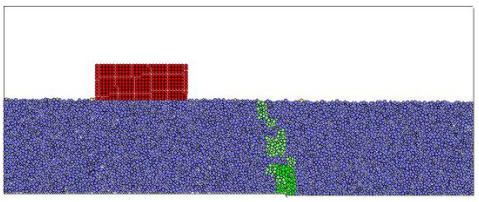


(b) q = 0.6γH

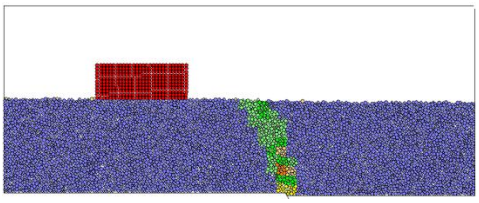
圖 3-3-26 X*=1.5B 時不同重量的結構物受影響之差別



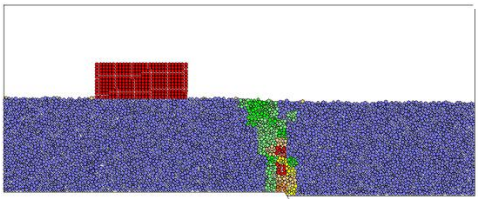
(a)ΔH/H = 1%



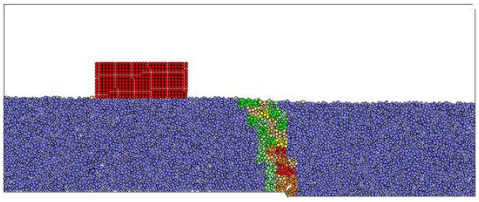
(b)ΔH/H = 2%



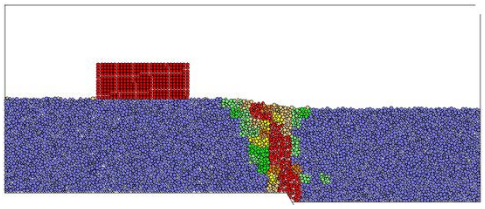
(c)ΔH/H = 3%



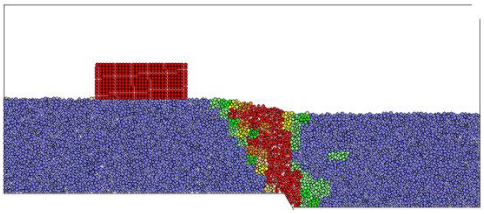
(d)ΔH/H = 4%



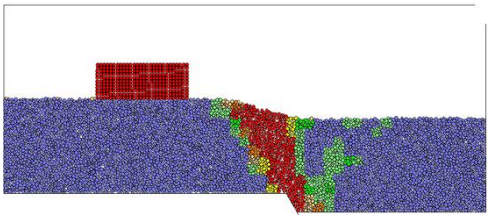
(e)ΔH/H = 5%



(f)ΔH/H = 10%

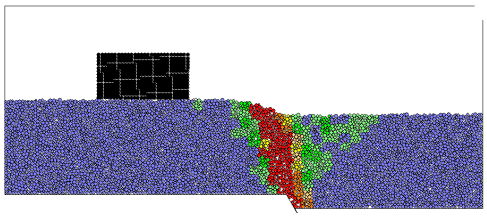


(g)ΔH/H = 15%

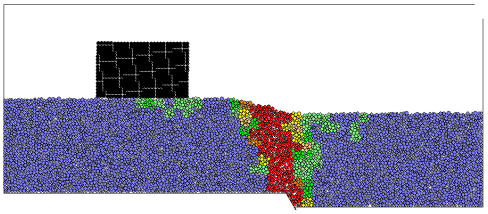


(h)ΔH/H = 20%

圖 3-3-27 剪切帶受結構物影響模擬結果(X*=2.0B)

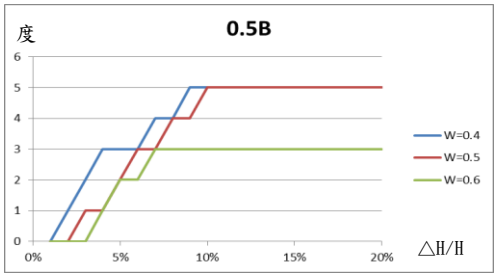


(a) q = 0.5γH

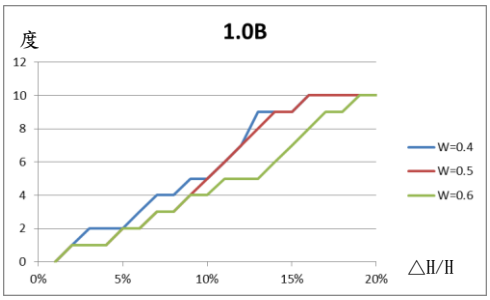


(b) q = 0.6γH

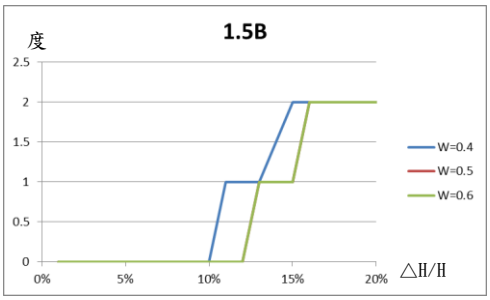
圖 3-3-28 X*=2.0B 時不同重量的結構物受影響之差別



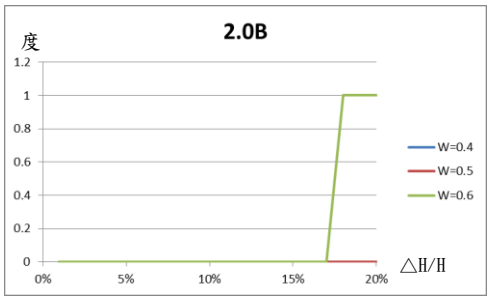
(a) X^*=0.5B



(b) X^*=1.0B



(c) X^*=1.5B



(d) X^*=2.0B

圖 3-3-29 不同重量的結構物受影響之差別

3.3.3. 高 g 模擬

砂試體正斷層錯動的 PFC2D 模擬，利用與逆斷層錯動數值模擬相同的微觀參數來進行數值試驗，包括覆土應力等於 0.155 kN/m^2 時，$K_n = 0.58 \times \frac{10^7 N}{m}$條件下，m=0.4，$\frac{K_n}{K_s} = 3$，及$\mu = \tan 36^o$，利用這三個微觀參數，以及本研究所建立的數值模型(圖 2-4-18(c))，來模擬離心正斷層錯動模型試驗。圖 3-3-30 為 PFC2D 數值試驗與 80g 物理模型試驗(80gNtest24)之地表沈陷剖面的比較，顯示 PFC2D 的計算成果有較平緩的邊坡，有更多的砂土崩落於坡腳，而 80g 物理模型正斷層試驗成果則有較陡的邊坡。造成兩者差異的原因可能是假設 PFC2D 的微觀參數μ等於石英的基本摩擦角=25^o 較低所導致。本研究模型試驗所使用的試驗用砂是磨碎細砂(crushed sand)，砂顆粒為角狀且表面粗糙，導致砂顆粒基本摩擦角較大。圖 3-3-31 則採用基本摩擦角=30^o（μ =0.577），PFC2D 數值試驗與 80g 物理模型試驗(80gNtest24)之地表沈陷剖面的比較，圖 3-3-32 則採用基本摩擦角=36^o（μ =0.726），PFC2D 數值試驗與 80g 物理模型試驗(80gNtest24)之地表沈陷剖面的比較，顯示採用 $K_n = 0.58 \times \frac{10^7 N}{m}$條件下，m=0.4，$\frac{K_n}{K_s} = 3$，及$\mu = \tan 36^o$ ，PFC2D 的計算成果和離心模型試驗的成果有相當高的吻合度。

由前面模擬砂試體正斷層錯動的離心模型試驗得到的結論顯示，在斷層尖端處會形成地塹，但是 PFC2D 的數值試驗卻無法模擬此現象。可能的原因為微觀參數μ較低，有較多的砂土崩落堆積於於坡腳，並填充於此地塹，導致斷層尖端處不會形成地塹，但是提高微觀參數μ後，仍然無法模擬地塹的形成。另一可能的原因則為 PFC2D 數值試驗的顆粒太大(直徑 2.5mm)，而地塹的寬度約為 50 mm，在此地塹的範圍大約僅有有 20 根圓棍，由於尺寸效應及土壤拱化現象(圖 3-3-33)，可能無法自由陷落所造成。土壤的勁度愈大，則拱化現象也愈明顯。

60^o 正斷層斜向下移，會造成如圖 3-2-14 所示的側向及覆土層底部的應力解壓，而應力的減少會造成 K_n 減小，導致變位加大，可以減少及弱化斷層尖端附近的土壤拱化現象。因此利用隨著正斷層的垂直錯動量的增加，逐漸降低 K_n 值，來改善數值試驗無法模擬地塹的問題。參考圖 3-3-33 拱化的範圍，估計影響範圍約為斷層尖端(fault tip)以左 10cm 及以

右 5cm 的範圍，左側以(0.2-0.1/150000)* i_遞減 K_n 值，右側則以(1-0.9/150000)* i_遞減 K_n 值，其中 i 為執行步驟的步數。圖 3-3-34 為利用此方法重新計算，在不同垂直錯動量下，正斷層離心模型試驗的地表沈陷與 PFC2D 數值試驗結果的比較(ϕ_μ=36^o) ，數值模擬與物理模擬兩者比較的結果顯示，地塹已可利用 PFC2D 來模擬。圖 3-3-35 顯示經過降低 K_n 值後，PFC2D 正斷層數值試驗顆粒接觸力鏈結分佈圖(ϕ_μ=36^o，垂直錯動量=5 cm) ，已經大幅減少土拱的效應。圖 3-3-36PFC2D 砂試體正斷層數值試驗，垂直錯動 5cm 後，試體內垂直變位的等高線圖，此圖亦顯示正斷層所產生的地塹範圍及反向斷層發生的位置。而圖 3-3-37 中顯示 PFC2D 砂試體正斷層數值試驗，垂直錯動 5cm 後，試體內網格的變位圖。比較圖 3-2-15 與圖 3-3-37 可以發現 PFC2D 砂試體正斷層數值試驗，可適當的模擬離心正斷層錯動的試驗成果。

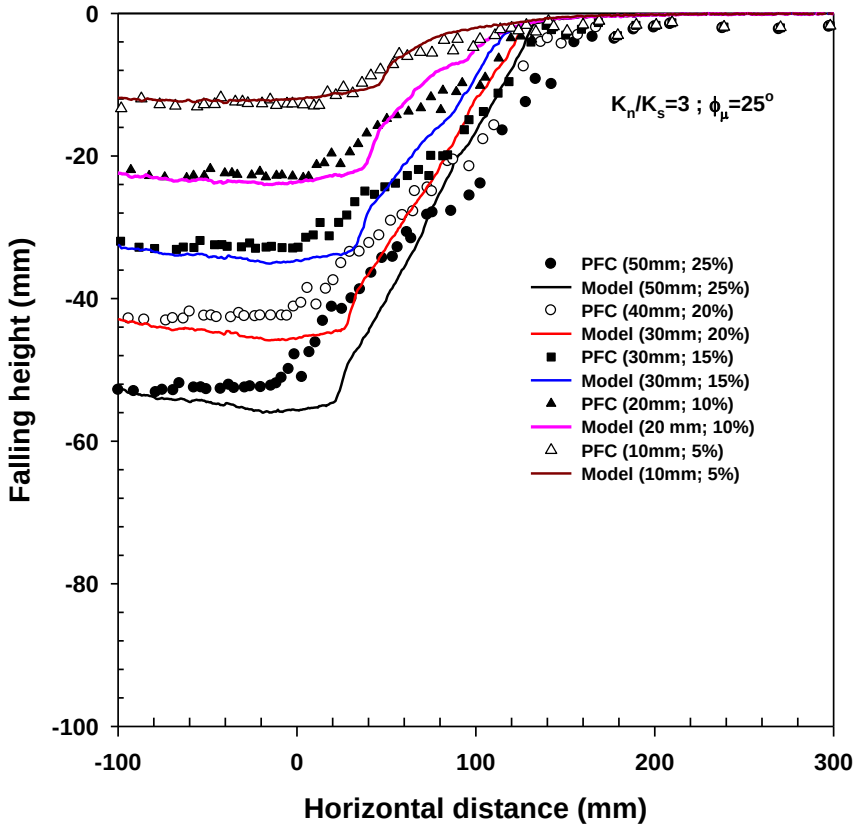


圖 3-3-30 不同錯動量下正斷層離心機試驗的地表沈陷與 PFC2D 數值試驗結果比較(ϕ_μ=25^o)

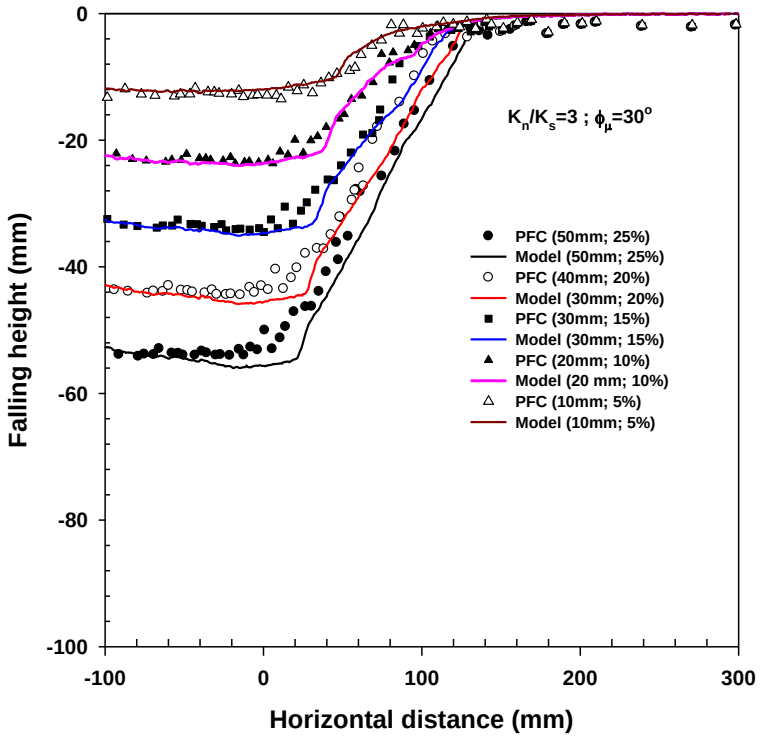


圖 3-3-31 不同錯動量下正斷層離心機試驗的地表沈陷與 PFC2D 數值試驗結果比較

(ϕ_μ=30°)

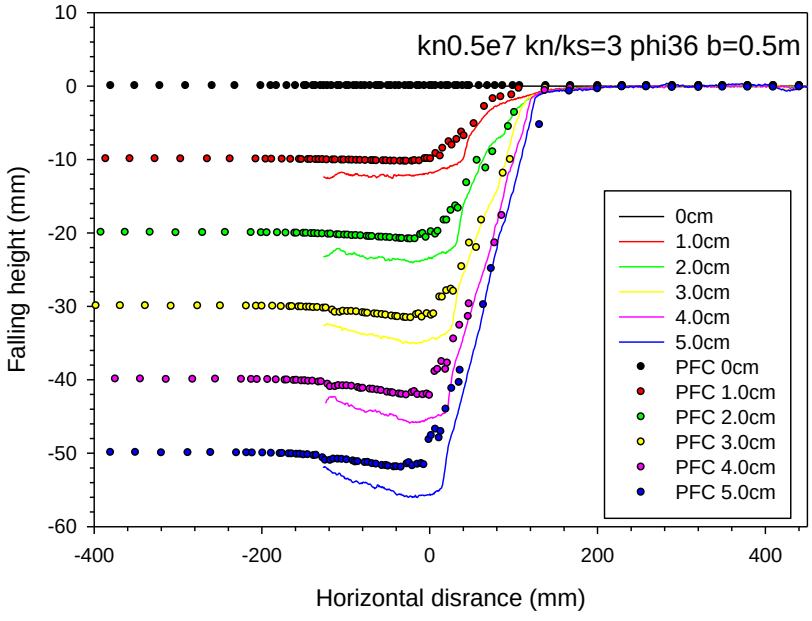


圖 3-3-32 不同錯動量下正斷層離心機試驗的地表沈陷與 PFC2D 數值試驗結果比較

(ϕ_μ=36°)

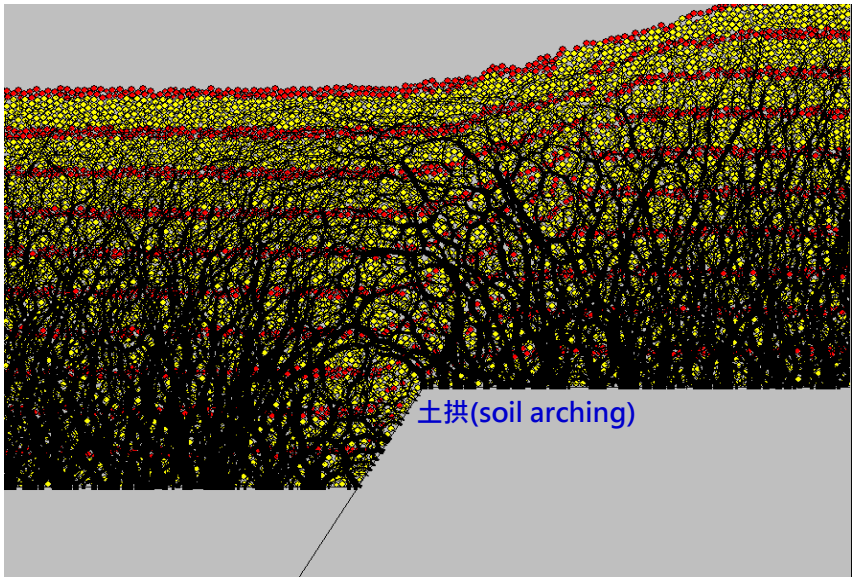


圖 3-3-33 PFC2D 正斷層數值試驗顆粒接觸力鏈結分佈圖(ϕ_μ=36^o，垂直錯動量=5 cm)

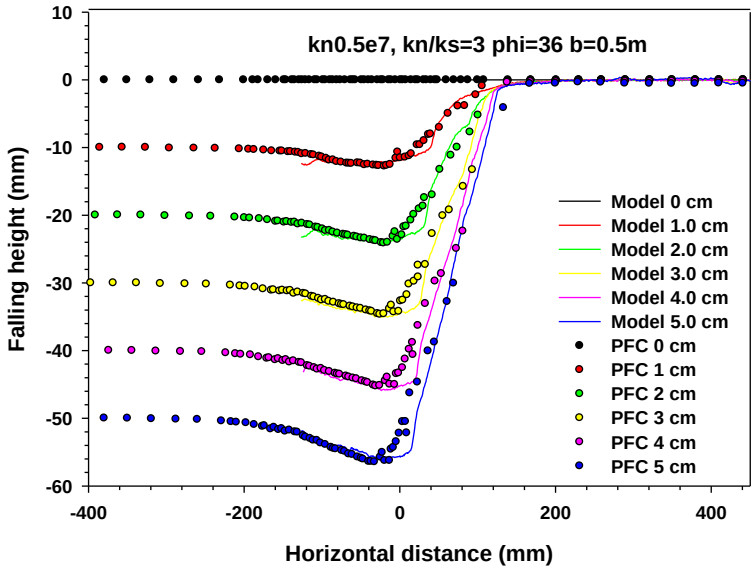


圖 3-3-34 不同錯動量下正斷層離心機試驗的地表沈陷與 PFC2D 數值試驗結果比較($\phi\mu$=36^o)

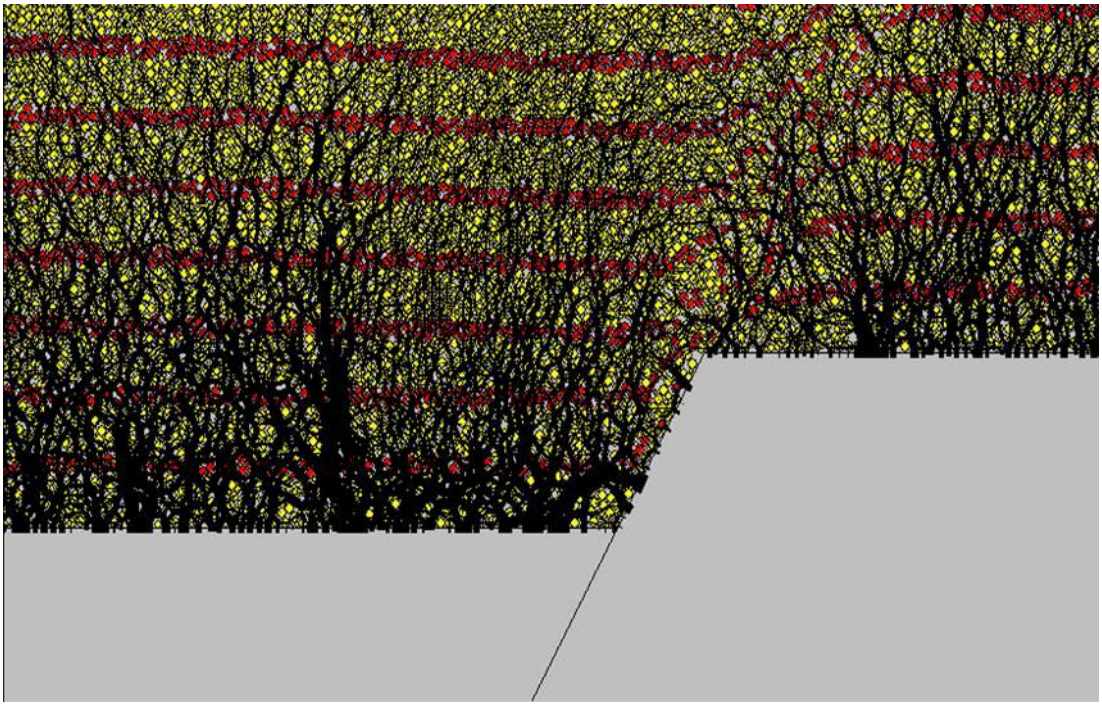


圖 3-3-35 降低 K_n 後 PFC2D 正斷層數值試驗顆粒接觸力鏈結分佈圖(ϕ_μ=36°，垂直錯動量=5cm)

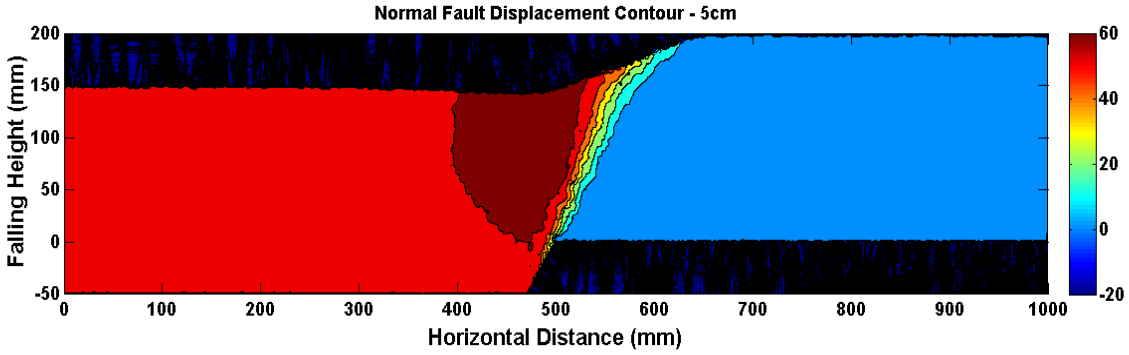


圖 3-3-36 PFC2D 砂試體正斷層數值試驗，垂直錯動 5cm 後，試體內垂直變位的等高線圖

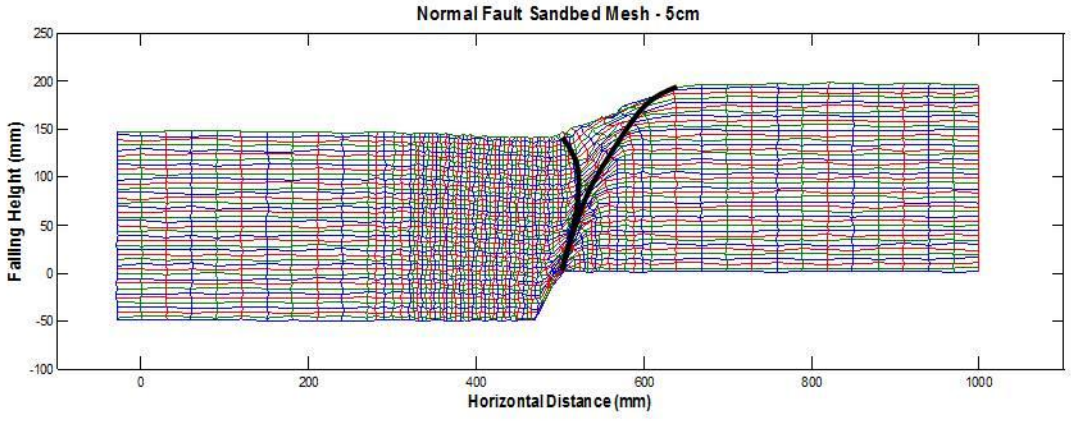


圖 3-3-37 PFC2D 砂試體正斷層數值試驗，垂直錯動 5cm 後，試體內網格變位圖

第四章 結論

4.1. 現地調查

A. 由美國新墨西哥州的 Pajarito 斷層之研究經驗可以得知，正斷層的錯若是長期的行為，其地表的變形不會只有一條正斷層，還會有許多分支斷層、反向斷層的現象發生。依據此一經驗，有助於在解讀山腳斷層井下資料時可以做更好的研判。

B. 為了整合不同時期的鑽井井錄及圖例，本研究利用地調所提供之「活動斷層岩心調查系統」重繪井錄，共計 48 口。繪製出來的成果有助於山腳斷層位置的研判，以樹林剖面為例，的確可以看到 SCF15-SCF16 鑽孔之間的基盤有一個無法以古地形面來解釋的落差存在；以成子寮剖面為例，在 SCF5-SCF6 之間也可以看到基盤的落差，並且可以看到 Huang et *al*(2007)年所提出的生長地層。

C. 目前已透過整理仙渡超高壓變電所鑽探資料，提出進行山腳斷層數值模擬之簡化土層可為為四層，工程參數如下：從地表下 0~10 公尺為回填層；地表下 10~80 公尺的黏土層是工程中最重要的範圍，大部份不論淺基礎或深基礎都落在此範圍中，其中地表下 10~40 公尺為黏土層，不排水剪力強度為 45kPa；地表下 40~80 公尺為黏土層偶夾岩塊砂屑，不排水剪力強度為 80kPa；地表下 80 公尺以下視為岩盤。

4.2. 室內實驗

4.2.1. 生長斷層實驗

A. 正斷層如含有生長斷層，當基盤錯動時，剪切帶會沿原覆土層之剪切帶弱面向上發展。且此剪切帶會比單一覆土層，更為快速發展至地表，錯移率僅需單一覆土層之約 1/2~1/3，並且在生長層內的剪切帶，會沿著既有剪切帶中最靠近下盤的那一條繼續發展。針對山腳斷層之週邊之重大工程設計分析，應需考慮生長斷層之影響，進行鑽孔調查是否有生長斷層之證據，生長斷層之剪切帶發展代表最近一次斷層錯動對上覆土層之影響，因此剪切帶之可能範圍內，須特別加以注意。

4.2.2. 離心機實驗

A. **砂土試體 60 度傾角逆斷層的影響範圍約為 1 倍上覆土層厚度**，上覆土層愈厚，影響範圍愈寬廣。試驗結果亦顯示上覆土層厚度愈厚（高 g 的試驗條件），由於砂土的膨脹角受到高覆土應力的壓抑，相較於 1g 條件下的試體，地下土層的剪裂帶比較不容易發展。在相同的垂直錯動量所測得的地表變位，g 值越小坡度越陡，特別在 1g 的試驗，斷層所形成坡度較陡，坡面也較不規則，這現象可能是砂土微小的吸力(suction)所造成假凝聚力的影響。

B. **砂土試體傾角 60 度正斷層的影響範圍約為 0.8 倍上覆土層厚度**，上覆土層愈厚，影響範圍也愈寬廣。當垂直陷落量約為 6.25%時有最陡的邊坡坡角，之後邊坡就會逐漸向前崩落及堆積，成為單一較平緩的邊坡，陷落最深處大約出現在斷層尖端所處位置。試驗結果顯示上覆土層越厚(也就是 g 值越大的情況)，由於砂土的膨脹角受到較高覆土應力的抑制，相較於上覆土層厚度較小的條件(1g 的情況)下的試體的剪切帶較不容易發展。另外，在高 g 的情況下正斷層陷落所形成的邊坡高度較高，邊坡土壤容易崩落堆積於坡角，造成最大陷落深度較淺。此地表陷落量會隨著距斷層尖端的距離愈遠而逐漸減少，並趨近於斷層的陷落量(正規化陷落量趨近 1)。試驗成果亦顯示當垂直陷落量較大時，上盤會出現反向斷層。

C. **黏土試體傾角 60 度正斷層的影響範圍約為覆土層厚度的 1.9 倍**，遠比砂土試體的範圍更為寬廣，但坡度相對於砂土試體的坡度較為緩和。另外在試驗過程中會產生多條裂縫，大約在垂直陷落量為覆土層厚度 1%時，第一條裂縫開始出現，隨著陷落量的增加，地表裂縫的條數、深度及寬度亦逐漸增加。試驗的 g 值愈高，裂縫的深度也愈深。

D. **黏土試體傾角 60 度逆斷層的影響範圍約為覆土層厚度的 2.2 倍**，遠比砂土試體的範圍更為寬廣，也比黏土正斷層陷落範圍為廣。雖然影響範圍較為寬廣，但地表剖面的坡度相對於砂土試體的坡度則較為緩和。裂縫主要集中在上盤發展，而且裂縫深度相較於正斷層為淺且條數也較少。

4.1. 數值分析

A. 由數值模擬結果可以看到與砂箱實驗相同的的結果：當斷層傾角越低時剪切帶範圍越寬，也越容易發生反向斷層及出現地塹構造。而當上覆土層越厚時，在上下盤皆會出

現剪切帶，也就是在地表之剪切帶越寬廣的意思，但由數值模擬之結果可以看到其剪切帶是呈現「T」字形的樣式。

B. 在生長層的數值模擬中可以看到與砂箱實驗相同的結果，也就是有生長斷層時，剪切帶會更快速發展至地表，且生長層中的剪切帶會沿著既有剪切帶中最靠近下盤的那條繼續向地表發展。另外，生長層越多層也越容易發展出反向斷層，並且影響範圍越遠。

C. 用離心模型試驗升 g 過程中，所量測到的地表沈陷來校正 PFC2D 的微觀參數K_n，在固定的$\frac{K_n}{K_s}=3$條件下，可以決定K_n隨覆土應力(或深度)增加而增加的函數關係。利用校正所得的微觀參數，以 PFC2D 數值試驗與 80g 物理模型試驗之地表沈陷剖面進行比較，顯示採用$K_n=0.58\times\frac{10^7 N}{m}$條件下，m=0.4，$\frac{K_n}{K_s}=3$，及$\mu=\tan 36^o$=0.726，逆斷層之模擬成果和離心模型試驗的成果相當吻合。正斷層模擬比需隨著垂直錯動量的增加，逐漸降低 K_n 值來改善無法模擬地塹的問題，經由逐階改變位於斷層尖端(fault tip)左 10cm 及右 5cm 範圍內顆粒的 K_n 值，可以成功模擬正斷層所產生的地塹範圍以及反向斷層的位置。

參考文獻

Aldrich, M.J., Dethier, D.P. (1990) Stratigraphic and tectonic evolution of the northern Espan˜ola Basin, Rio Grande rift, New Mexico. Geological Society of America Bulletin 102, 1695–1705.

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.

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.

Chen, C.T., Lee, J.C., Chan, Y.C. and Lu, C.Y. (2012) Growth Normal Faulting at the Western Edge of the Metropolitan Taipei Basin since the Last Glacial Maximum, Northern Taiwan. Terr. Atmos. Ocean. Sci., Vol. 21, No. 3, 409-428.

ERI (Japan Earthquake Research Institute) (2011) The surface earthquake fault of the 11th April 2011 earthquake in Hamadoori Fukushima pref.

Erslev, E.A., (1991) Trishear fault-propagation folding. Geology 19, 617-620.

Gardner, J.N., Baldridge, W.S., Gribble, R., Manley, K., Tanaka, K., Geissman, J.W., Gonzalez, M., Baron, G. (1990) Results from seismic hazards trench #1 (SHT-1). Los Alamos Seismic Hazards Investigations: Los Alamos National Laboratory Report EES1-SH90-19. 57 pp.

Hashimoto, C. and M. Matsu'ura (2006) 3-D simulation of tectonic loading at convergent plate boundary zones: Internal stress fields in northeast Japan, Pure Appl. Geophys., 163, 1803–1817, doi:10.1007/s00024-006-0098-y.

Huang, S. Y., Rubin, C.M., Chen, Y. G. and Liu, H. C. (2007) Prehistoric earthquakes along the Shanchiao fault, Taipei Basin, northern Taiwan. J. Asian Earth Sci., 31, 265-276.

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

Imanishi, K., Ando, R. and Kuwahara Y. (2012) Unusual shallow normal-faulting earthquake sequence in compressional northeast Japan activated after the 2011off the Pacific coast of Tohoku earthquake, Geophys. Res. Lett., 39, L09306, doi:10.1029/2012GL051491.

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

Kelley, V. C., 1978, Geology of Española basin, New Mexico: New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources Geologic Map 48, scale 1:125,000.

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.

Kelson, K.I., Hemphill-Haley, M.A., Olig, S.S., Simpson, G.D., Gardner, J.N., Reneau, S.L., Kolbe, T.K., Forman, S.L., Wong, I.G., 1996. Late Pleistocene and possibly Holocene J.P. McCalpin / Tectonophysics 408 (2005) 213–236 235 displacement along the Rendija Canyon fault, Los Alamos County, New Mexico. New Mexico Geological Society Guidebook, 47th Field Conference, Jemez Mountains Region.

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/
Kulhawy, F.H. and Mayne, P.W. (1990) Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design, EPRI EL-6800
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.
Loveless, J. P. and Meade, B. J. (2011) Spatial correlation of interseismic coupling and coseismic rupture extent of the 2011 MW = 9.0 Tohoku-oki earthquake, Geophys. Res. Lett., 38, L17306, doi:10.1029/2011GL048561.
Lu C.Y., Angelier J., Chu H.T. and Lee J.C. (1995) Contractional, transcurrent, rotational and extensional tectonics: examples from northern Taiwan, Tectonophysics, 246(1-3), 129-146.
McCalpin, J. P., 2005. Late Quaternary activity of the Pajarito fault, Rio Grande rift of northern New Mexico, USA, Tectonphysics, 408, 213-236
Olig, S.S., Kelson, K.I., Gardner, J.N., Reneau, S.L., Hemphill-Haley, M.A. (1996) The earthquake potential of the Pajarito fault system, New Mexico. New Mexico Geological Society Guidebook,47th Field Conference, Jemez Mountains, pp. 143– 152.
PFC2D version 3.0 online user manual。
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.
Reyners, M. and McGinty, P. (1999) Shallow subduction tectonics in the Raukumara Peninsula, New Zealand, as illuminated by earthquake focal mechanisms, J. Geophys. Res., 104(B2), 3025–3034, doi:10.1029/1998JB900081.
Sexton, C. J. (2008) "Implementing the California earthquake fault zoning act: A Proposal for Change". Environmental and Engineering Geoscience, 14(1), 43-51.
Shearad, J.L., Cluff, L.S. and Allen, C.R. (1974) "Potentially active faults in the dam foundation". Geotechnique 24(3), 367-428.
Smith, R.L., Bailey, R.A. (1966) The Bandelier Tuff; a study of ashflow eruption cycles and zoned magma chambers. Bulletin Volcanologique 29, 83–104.
Song, S.R., Chen, T.M., Tsao, S.J., Chen H.F. and Liu, H.C. (2007) Lahars in and around the Taipei basin: Implications for the activity of the Shanchiao fault, J. Asian Earth Sci., 31, 277-286.
Stoffer, W.P. (2008) "Where's the Hayward Fault? A Green Guide to the Fault" USGU.
Teng, L.S. (1996) Extensional collapse of the northern Taiwan mountain belt, Geology, 24, 945-952.
Teng, L.S., Lee, C.T., Peng, C.H., Chan, W.F. and Chu, C.J. (2001) Origin and geological evolution of the Taipei Basin, northern Taiwan, Western Pacific Earth Sciences, 1, 115-142.
Teng, L.S., Yuan, P.B., Yu, N.T. and Peng, C.H. (2000) Sequence stratigraphy of the Taipei Basin deposits: a preliminary study, Journal of the Geological Society of China, 43, 497-520.
Treiman JA (2010) "Fault rupture and surface deformation: Defining the hazard". Environmental and engineering geoscience 16 (1), 19-30.
Turcotte, D.L. and Schubert, J. (2002) Geodynamics, 2nd ed., 456 pp., Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K.
von Huene, R., Weinrebe, W. and Heeren, F. (1999) Subduction erosion along the north Chile

margin, J. Geodyn., 27, 345–358, doi:10.1016/S0264-3707(98)00002-7.
Walia, V., Su, T.C., Fu, C.C. and Yang T.F. (2005) Spatial variations of radon and helium concentrations in soil-gas across the Shan-Chiao fault, Northern Taiwan. Radiat. Meas., 40, 513-516.
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.
Wong, I. et al. (1995) Seismic hazards evaluation of the Los Alamos National Laboratory, Final Report: submitted to Los Alamos National Laboratory by Woodward Clyde Federal Services, 25 Feb. 1995. 3 vols.
Yimsiri, S. and Soga, K. (2000) Micromechanics-based stress-strain behavior of soils at small strains, Geotechnique 50, No.5 pp.591-571.
丸山正、齊藤英二、齊藤勝 (2012) 變動地形-基於 2011 年 4 月 11 日福島縣浜通的地震相關的斷層活動性的古地震學檢討，Japanese Active Fault and Earthquake Research Center News No. 34.(http://unit.aist.go.jp/actfault-eq/index.html) (日文)
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。（日文）
丹桂之助 (1939) 台北盆地之地質學考察。矢部教授還曆紀念論文集，第 1 卷，371~380 頁。
王執明、鄭穎敏、王源 (1978) 台北盆地之地質及沉積物研究，台灣礦業，30(4)，350-380。
仙渡超高壓變電所暨北北區配電中心新建工程基地地質調查報告書 (2003) 台灣電力公司輸變電工程處，皇昌營造股份有限公司。
仙渡超高壓變電所暨北北區配電中心新建工程補充土壤地質調查及大地工程分析報告書 (2004) 台灣電力公司輸變電工程處，富國技術工程股份有限公司。
出口雄三 (1912) 大屯火山彙地質調查報文，臺灣總督府民政部殖產局出版，102。
宋聖榮 （2007） 臺灣第四紀火山活動。經濟部中央地質調查所特刊，18，111-142。
李錦發、林朝宗、賴典章、蘇泰維、邱禎龍、曾俊傑(1999) 臺北盆地成因之探討，經濟部中央地質調查所特刊，11，207-226。
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。
松田時彥 (1975) 活斷層錯動發生可能地震規模與周期之關係，地震 2 輯，28，269-283
林啟文、陳文山、饒瑞鈞 (2007) 臺灣活動斷層調查的近期發展，經濟部中央地質調查所特刊，18，85-110。
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、賴典章、費立沅、劉桓吉、紀宗吉、蘇泰維 (1999) 臺北盆地八十一至八十五年度地質深井鑽探取樣成果，經濟部中央地質調查所特刊，11，7-39。
牧山鶴彥 (1933) 台灣北部的洪積層，地質學雜誌，40(477)，398-400。
洪汶宜、張有毅、陳婷、李崇正、黃文昭、黃文正、林銘郎、林燕慧 (2012) 逆斷層引致近地表變形之離心模擬。2012 岩盤工程研討會，苗栗，739-748。
洪奕星、彭慧蘭、劉桓吉、賴慈華、黃智昭、費立沅(2006) 臺北盆地沉積相和沉積環境分析,西太平洋地質科學，6，59-86。
孫思優、吳柏林、田永銘 (1999) 活動斷層附近禁、限建問題探討，1999 集集大地震災害調查研討會，台北，台灣大學， VI-33-VI-66。
張有毅、李崇正、黃文昭、林銘郎、黃文正、林燕慧、洪汶宜 (2012) 逆斷層引致近地表之變形特性研究，中華民國第十一屆結構工程研討會暨第一屆地震工程研討會，台中。

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。
莊釗鳴 (2010) 林口台地大南灣層的沈積環境，國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文，台北。
陳于高、劉聰桂、王源 (1990) 大漢溪下游一埋沒谷之碳十四定年與沉積環境，地質，10，147-156。
陳文山、林朝宗、楊志成、費立沅、謝凱旋、龔慧敏、林佩儀、楊小青 (2008) 晚期更新世以來臺北盆地沉積環境與構造演化的時空演變，經濟部中央地質調查所彙刊，21，61-106。
陳咨默 (2001) 臺北盆地火山泥流堆積物的研究及其意義，國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文，台北。
陳致同 (2012) 台北都會區山腳活斷層之地震地質研究，國立臺灣大學地質科學研究所博士論文，台北。
陳師賢 (2007) 結合物理試驗與數值模型模擬山腳斷層上覆土層變形行為，國立臺灣大學土木工程學研究所碩士論文，台北。
彭志雄、鄧屬予、袁彼得 (1999) 台北盆地的岩相特徵，經濟部中央地質調查所特刊，11，67-99。
經濟部中央地質調查所 (2007) 台灣北部的活動斷層二萬五千分之一活動斷層條帶圖說明書，特刊，第十九號，共 117 頁。
劉桓吉、蘇泰維、李錦發、紀宗吉、林朝宗 (2000) 山腳斷層之活動性及其對工程安全之影響。經濟部 89 年度研究發展報告，共 30 頁。
劉桓吉、蘇泰維、邱禎龍、曾俊傑、紀宗吉、林文哲、李錦發、費立沅、賴典章、林朝宗、黃健政 (2002) 台北盆地地下地質與工程地質研究，90 年度經濟部中央地質調查所年報，第 59-64 頁。
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。
鄧屬予 (2006) 臺北盆地之地質研究，西太平洋地質科學第六卷，1-19。
鄧屬予 (2007) 台灣第四紀大地構造，經濟部中央地質調查所特刊，18，1-24。
鄧屬予、李錫堤、劉平妹、宋聖榮、曹恕中、劉桓吉、彭志雄(2004a) 臺北堰塞湖考證，國立臺灣大學理學院地理學系地理學報，36，77-100。
鄧屬予、袁彼得、陳培源、彭志雄、賴典章、費立沅、劉桓吉(1999) 臺北盆地堆積層的岩性地層，經濟部中央地質調查所特刊，11，41-66。
鄧屬予、劉聰桂、陳于高、劉平妹、李錫堤、劉桓吉、彭志雄(2004b) 大漢溪襲奪對台北盆地的影響，師大地理研究報告，41，61-78。
蕭謙麗、林明聖 (2000) 九二一地震與車籠埔斷層的省思。環境教育季刊(41): 8-13。
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，地調所特刊。
蘇瑛敏、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，都市與計劃，30(4)，301-323。

附錄-

Location	Slip Type	Ms		M	Seismic Momentt (1026 dyne-cm)	Rupture Length (km)		Displacement(m)	
						Surface	Subsurface	Maximum	Average
USA, CA	RL	8.3	[I]	7.85	670	297		9.4	6.4
USA, CA	RL	6.8	[I]	6.76	15.6	48		0.9	
Japan	LL	8	[I]	7.49	190	80		8	5.04
USA, CA	RL	7.8	[B]	7.9	790	432		6.1	3.3
China	LL	8.5	[G]	8.02	1200	220		10	7.25
lran	N-RL	7.4	[L]	7.15	60	30		6.4	1.35
New Zealand	R-RL	7.8	[G]	7.73	440	15	110	4.6	
Ch ìna	RL	7.9	[L]	7.92	850	180		14.6	7.38
Japan	LL	6.7	[G]	6.52	6.8		20		
USA, Nevada	RL	7.2	[G]	6.83	19.7	61	80	2	
China	R-LL	7.7	[L]	7.6	280	148		4	2
USA, CA	RL	6.3	[G]	6.38	4.1		23		
Japan	RL	5.5	[J]	5.29	0.095		7S		
Turkey	RL	6.8	[L]			14		1	
Turkey	RL	7.8	[L]	7.81	575	360		7.5	1.85
USA, CA	RL	7.2	[L]	6.92	27	60	45	5.9	1.5
Japan	RL	7 .4	[L]	7	36	4.7	33	1.5	0.5
Turkey	RL	7.5	[L]	7.58	260	280		1.9	0.57
Turkey	RL	7.5	[L]	7.59	270	180		3.6	1.8
Turkey	RL	6	[G]			9		0.3	
Taiwan	RL	6.7	[L]			12		2.1	
USA, CA	RL	6.5	[G]	5.97			15		
Turkey	RL	6.9	[A]			38		1. 6	0.9
USA, CA	RL	5.6	[ML]			3		0.05	
China	RL	8	[G]	7.67	365	90	200	12.0	8
USA, CA	R-LL	7.7	[L]	7.38	130	57	64	3	0.6
Turkey	RL	7.2	[L]	7.22	77	58		4.35	2.1
USA, CA	RL	6.2	[D]	6.27	2.89		15		
Turkey	RL	7.0	[A]			40		1.65	0.55
MongoIia	LL	7.9	[L]	8.14	1800	236	300	9.4	6.54

Location	Slip Type	Ms		M	Seismic Momentt (1026 dyne-cm)	Rupture Length (km)		Displacement(m)	
						Surface	Subsurface	Maximum	Average
USA, A1aska	RL	7.9	[U]	7.77	510	200	350	6.6	
Japan	RL	6.5	[D]	6.28	3		20		
USA, CA	RL	5.4	[U]	5.17	0.063		7		
USA, CA	RL	5.1	[ML]				4		
USA, CA	RL	4.9	[ML]				3		
USA, CA	RL	6.4	[W]	6.25	2.7	38.5	35	0.2	
USA, Nevada	RL	5.8	[ML]	5.58	0.26		11		
Turkey	RL	6.8	[B]	6.88	23.5	30	85	0.4	0.15
USA, CA	LL	5.9	[PB]	5.96	0.97		13		
Mongolia	RL	7.4	[L]	7.03	39	40	40	1.3	
Turkey	RL	7.4	[L]	7.34	113	80	70	2.6	1.63
Greece	RL	7.2	[B]	7.1	50.8	4.4	70	0.5	
USA, CA	RL	6.8	[L]	6.63	10	31	40	0.38	0.18
New Zealand	R-LL	7.1	[U]	7.07	45	2	41	0.52	
Irω	LL	7.1	[L]	7.23	78	80	110	5.2	2.3
Australia	R-RL	6.9	[L]	6.61	9.3	36	20	3.5	0.9
USA, Alaska	LL	6.5	[U]	6.69	12		30		
Japan	RL	6.6	[J]	6.34	3.6		18	0.72	
South Africa	RL	6.3	[U]	6.37	4		20		
Peru	R-LL	6.2	[U]	6.63	9.84	16	30	1.2	
China	RL	7.5	[L]	7.26	87	48	75	2.7	2.1
Japan	R-RL	5.8	[U]	6.13	1.75		14		
USA, CA	R-LL	6.5	[L]	6.64	10.4	16	17	2.5	1.5
Turkey	LL	6.7	[U]	6.63	10	38		0.6	0.25
USA, CA	RL	5.1	[ML]	5.23	0.078		6		
USA, CA	LL	4.7	[ML]	4.57	0.008		3.8		
USA，Alaska	RL	7.6	[U]	7.7	400		180		
USA，CA	RL	4.7	[ML]	4.83	0.02		2.6		
USA，CA	RL	4.8	[ML]	4.77	0.016		4.3		
Nicaragua	LL	6.2	[L]	6.31	3.3	5.9	15	0.67	
China	LL	7.3	[L]	7.47	180	89	110	3.6	1.3
USA， CA	RL	4.8	[ML]				3		

Location	Slip Type	Ms		M	Seismic Momentt (1026 dyne-cm)	Rupture Length (km)		Displacement(m)	
						Surface	Subsurface	Maximum	Average
USSR	R-RL	7.3	[U]	7.06	43.8		30		
USA，CA	RL	4.6	[U]			10.4	9	0.2	
China	LL	7.4	[U]	6.99	34.5	5.5	60	0.55	
USA，CA	RL	5.2	[U]			6.8	5	0.02	
USA，WY	N-RL	5.9	[U]	5.88	0.75		10		
USA，CA	N-RL	5.6	[U]	6.01	1.18	3.8	8	0.06	
USA， CA	RL	4.7	[ML]	5	0.035		2		
Guaternala	LL	7.5	[L]	7.63	310	235	257	3.4	2.6
Chìna	RL	7.9	[U]	7.46	176	10	70	3.0	
Japan	RL	5.4	[J]	5.51	0.21		9		
Turkey	RL	7.3	[L]	7.23	79	55	90	3.5	2.05
Mexìco	RL	5.7	[U]	5.61	0.29		9		
USA，CA	RL	4.8	[ML]	5.24	0.082		5		
Iran	RL	5.8	[L]	5.89	0.76	12	14	0.3	0.12
Japan	RL	6.6	[U]	6.71	13.2	3.2	50	1.0	
USA, WA	RL	4.8	[ML]				2.5		
USA, CA	R-LL	5.6	[U]	5.88	0.75		10		
Gerrnany	LL	5.3	[U]	5.21	0.074		4.5		
USA, CA	RL	5.2	[ML]				1.7		
USA , CA	RL	5.6	[U]	5.55	0.241	3.9	6	0.1	0.05
USA, CA	RL	5.7	[U]	5.77	0.51	14.4	14	0.15	
Canada	R-RL	4.5	[U]	4.75	0.015		2		
USA. CA	RL	6.7	[L]	6.53	7.12	30.5	51	0.8	0.18
England	N-RL	4.8	[ML]				4		
USA, CA	RL	5.9	[U]	5.82	0.6	6.2	11.5	0.03	
USA, CA	RL	4.7	[U]	5.04	0.041		2.5		
USA, CA	LL	6.1	[U]	5.99	1.09		9		
Mexico	RL	6.4	[U]	6.4	4.5		28		
Japan	LL	6.2	[U]	6.39	4.3		14		
USA. KY	RL	4.7	[U]	5.06	0.043		1		
China	LL	6.8	[U]	6.64	10.1	44	46	1.5	
USA, WA	RL	4.8	[U]	5.30	0.1		6		
Iran	R-RL	6.7	[U]	6.57	8.07	15	16	0.11	0.06

Location	Slip Type	Ms		M	Seismic Momentt (1026 dyne-cm)	Rupture Length (km)		Displacement(m)	
						Surface	Subsurface	Maximum	Average
Iran	R-RL	7.1	[U]	7.12	53.5	65	75	0.5	1.6
USA, CA	RL	4.8	[ML]	4.79	0.017		2.5		
USA, CA	R-LL	5.2	[U]	5.46	0.172		9		
Columbia	SS/N	4.9	[U]	5.66	0.35	1.3		0.01	
USA. CA	R-LL	6.5	[U]	6.38	4.1		27		
USA, ldaho	N-LL	7.3	[U]	6.93	28	34	33	2.7	0.8
USA.CA	RL	6.1	[U]	6.28	3.0		26		
USA, Alaska	RL	5.2	[U]	5.84	0.64		8		
Japan	RL	6.1	[U]	6.24	2.6		12		
USA, CA	LL	5.7	[U]	5.83	0.62		7		
New Guinea	LL	7.1	[U]	7.19	69.3		50		
AIgeria	LL	5.9	[U]	6	1.11	3.8	21		
USA, CA	RL	5.3	[U]	5.42	0.15		11		
USA, Ohio	RL	5	[mb]	4.87	0.023		1.5		
Canada	R-RL	5.2	[U]	5.54	0.23		6		
Australia	R-LL	5.8	[U]	5.79	0.54	13	13	1.3	0.5
USA, CA	RL	5.5	[U]	5.64	0.32		5.5		
USA, CA	RL	6.2	[U]	6.31	3.2	15.8	20	0.11	
El Salvador	LL	5.4	[U]	5.74	0.45		6		
Mexico	LL	5.5	[U]	5.63	0.31		5		
USA, Illinois	RL	4.4	[U]	4.96	0.031		1.7		
USA, Utah	RL	4.6	[U]	5.02	0.038		5.5		
USA, CA	LL	6.2	[U]	6.2	2.6	10	30	0.2	0.2
USA, CA	RL	6.6	[U]	6.61	9.2	27	30	0.92	0.5
Australia	R-LL	6.4	[U]	6.38	4.1	6.7	13	1.17	0.6
China	RL	7.3	[U]	7.13	54.7	35	80	1.5	0.7
China	RL	7.2	[C]	6.83	20	12.6	6	1.1	0.6
USA, CA	LL	4.2	[U]	4.96	0.031		4.5		
USSR	R-RL	6.8	[U]	6.76	15.3	25	38	2.0	
USA， Utah	LL	4.8	[U]	5.33	0.11		5		
Japan	LL	6.4	[U]	6.37	4.05		16		
USA， CA	LL	5.5	[U]	5.59	0.27		4		
Iran	R-LL	7.7	[U]	7 .41	147	80	90	0.95	

Location	Slip Type	Ms		M	Seismic Momentt (1026 dyne-cm)	Rupture Length (km)		Displacement(m)	
						Surface	Subsurface	Maximum	Average
Philippines	LL	7.8	[U]	7.74	460	120	120	6.2	
USA，CA	RL	5.2	[U]	5.33	0.11		4		
USA，CA	R-LL	5.1	[U]	5.62	0.3		4		
USA，CA	R-RL	4.5	[U]	5.10	0.05		1.1		
Turkey	RL	6.8	[U]	6.87	22.8	30	38	0.2	
USA, CA	RL	6.3	[U]	6.27	2.9		15		
USA, CA	RL	7.6	[U]	7.34	114	71	62	6	2.95
USA, CA	LL	6.7	[U]	6.68	11.6		20		
northeastern Venezuela	RL	6.8						0.4	
Turkey	SS			7.4		150		5.7	3.5
Central Italy	N-LL			5.7		12		0.08	
Turkey	RL			7.2		40		4	
South Iceland	RL			6.6		20			
South Iceland	RL			6.6				2.15	
China	SS			**7.8**		430		16.3	
America,Alaska	RL	7.9							
USA,CA	SS-R								
Iran	RL	6.6				10			
northern Pakistan	RL	7.9							
Iran	RL	6.6				10			
USA,CA		6							
northern Pakistan	R-SS	7.6				70		10	2.8
USA, CA	RL-N	8	[I]	7.61	292	108		11. 0	6
MEXICO	N	7.4	[I]	7.31	105	75		4.5	1.9
Italy	N	7	[G]	6.62	9.7	20	24	2	
USA, Nevada	N	7.6	[L]	7.18	66	62		5.8	2
Kenya	N	7	[L]			31		3.3	
Bulgaria	N	6.9	[L]	7.13	55	50		3.5	
Turkey	RL-N	7.2	[L]	6.9	25	47		2	0.66
Peru	N	7.2	[G]	7.28	94	21	28S	3.5	

Location	Slip Type	Ms		M	Seismic Momentt (1026 dyne-cm)	Rupture Length (km)		Displacement(m)	
						Surface	Subsurface	Maximum	Average
USA, CA	N	5.6	[G]			9.2		0.2	
USA, Nevada	N	6.3	[L]	6.22	2.4		11	0.31	0.25
USA, Nevada	N	6.9	[L]	6.55	7.6		26	0.76	0.45
USA, Nevada	RL-N	7.2	[L]	7.17	64		50	4.1	2.8
USA, Nevada	RL-N	6.8	[PS]	6.94	29		42	3.8	2.1
USA, CA	N	5.3	[ML]	5.21	0.074		7		
USA, MT	N	7.6	[L]	7.29	95	26.5	45	6.1	2.14
USA, Utah	N	5.7	[ML]	5.78	0.52		7		
Yugoslavia	LL-N	6.1	[A]	5.99	l.l	6	17	0.1	
Albania	RL-N	6.6	[A]	6.75	15	10	62	0.5	0.2
Turkey	N	6.5	[A]	6.71	13	32	30	0.82	0.54
USA, CA	RL-N	5.8	[ML]	5.69	0.38		10		
China	RL-N	5.9	[U]	5.77	0.515		11		
Turkey	N	7.1	[L]	7.18	67	41	63	2.8	0.86
Chìna	N	6.9	[U]	6.95	29.6		27		
Japan	LL-N	4.9	[J]	4.97	0.032		3.5	0.09	
USA， Idaho	N	6	[U]	6.06	1.4		15		
New Zealand	RL-N	5.4	[ML]	5.61	0.29		8.5		
USA，Utah	N	5.1	[ML]				2		
Greece	N	6.4	[U]	6.43	5.02	19.4	28	0.22	0.08
USA, CA	N	5.1	[U]	5.47	0.18		7		
Ita1y	RL-N	5.9	[U]	5.83	0.63		10		
France	N	4.9	[mb]	5.17	0.064		3.8		
Greece	N	6.4	[U]	6.59	8.71	5.3	36	0.2	
Italy	N	6.9	[U]	6.91	26	38	60	1.15	0.64
Greece	N	6.7	[U]	6.63	10	15	30		
Greece	N	6.4	[U]	6.31	3.28	19		1.5	0.6
Greece	N	6.4	[U]	6.25	2.65	31	26	1.1	0.6
North Yemen	N	6	[U]	6.34	3.64	15	20	0.03	
Taiwan	N	5.4	[U]	5.72	0.427		9		
West Africa	RL-N	6.2	[U]	6.32	3.4	9.4	27	0.45	
Italy	N	5.3	[U]	5.65	0.35		17		
Italy	N	5.8	[U]	6	1.12		4.5		

Location	Slip Type	Ms		M	Seismic Momentt (1026 dyne-cm)	Rupture Length (km)		Displacement(m)	
						Surface	Subsurface	Maximum	Average
Great Britan	SS-N	4.7	[U]	4.63	0.01		3		
USA, WY	RL-N	5.1	[U]	5.31	0.102		3		
Peru	N	4.6	[U]	5.22	0.077	2.5		0.1	
Greece	N	5.8	[U]	5.93	0.89	15	15	0.18	0.15
New Zealand	N	6.6	[U]	6.5	6.3	18	32	2.9	1.7
Japan	N	4.9	[ML]				1.4		
China	LL-N	4.8	[I]	5.01	0.036		4		
USA, Utah	LL-N	5.3	[ML]				5		
USA, Nevada	N	5.4	[U]	5.69	0.38		8		
USA, CA	N	5.8	[U]	6.08	1.5	4.4	16.7	0.02	
Turkey	N	6				10		0.05-0.25	
Italy, Apennines	N	5.9				5		0.08	
Italy,Apennines	N	5.6							
Greece	N	5.9							
Central Italy	N	5.6(MW)				12		0.08	
Japan	R	7.2	[J]	7.4	140	40		4.4	2.59
Japan	LL-R	7.7	[L]	7.08	46	14	35	3	
Japan	LL-R	7.3	[L]	6.89	24	35	22	3.8	2.9
Taiwan	RL-R	7.1	[G]			17		2.1	
Japan	LL-R	7.3	[G]	6.98	33		30		
Japan	R?	6.3	[G]				11		
Taiwan	LL-R	7.4	[L]	7.08	46	43		2.1	
Mexico	RL-R	6.9	[L]	6.63	10		22	0.9	0.5
Iran	R	7.2	[L]	7.35	117	99		0.8	
Japan	R	7.5	[B]	7.59	273	40	60		
Peru	R	5.7	[U]	6.14	1.81	5.5		0.4	
Iran	R	6.9	[A]	6.75	15	20	34		
Pakistan	R	6.3	[mb]	6.19	2.2		13		
USA， CA	R	5.2	[U]	5.72	0.42		8		
Japan	RL-R	6.5	[U]	6.54	7.2	5.7	18		
Japan	LL-R	6.1	[U]	6.32	3.4		10		
Turkey	R	6.7	[U]	6.55	7.4	26		0.63	0.5

Location	Slip Type	Ms		M	Seismic Momentt (1026 dyne-cm)	Rupture Length (km)		Displacement(m)	
						Surface	Subsurface	Maximum	Average
USSR	R	7	[U]	6.83	19.5		30		
Italy	R	6.5	[U]	6.49	6		19		
USSR	R	7	[U]	6.84	20.7		48		
China	LL-R	6.9	[U]	6.71	13		30		
China	R	6.4	[U]	6.37	4		12		
China	LL-R	6.7	[U]	6.58	8.4		22		
Ican	R	6.9	[U]	6.73	14		32		
Argentina	R	7.4	[U]	7.48	189		80		
Iran	R	7.5	[U]	7.39	137	85	74	3	1.5
USA, CA	R	4.7	[U]				5		
Yugoslavia	R	6.9	[U]	6.98	32.9		50		
Australia	R	6.1	[U]	6.12	1.67	15	16	1.5	0.5
lran	RL-R	6.7	[L]	6.61	9.1	17	28	1.1	
Iran	LL-R	7.1	[L]	7.17	63	65	75	3.9	1.2
Algeria	R	7.3	[L]	7.10	50.8	31.2	55	6.5	1.54
Canada	R	5.2	[U]	5.55	0.24		5.5		
USA, CA	R	5.4	[U]	5.42	0.15	3.3	8	0.64	
USA, NY	R	5.1	[ML]	4.89	0.024		1.5		
Turkey	LL-R	6.9	[U]	6.73	14	12	50	1.2	
Belgium	RL-R	4.3	[A]	4.77	0.016		5		
Argentina	R	5.9	[U]	5.87	0.72		16		
New Guinea	R	7.2	[U]	7.23	79		48		
USA, CA	R	5.9	[U]	6.09	1.53		20		
China	R	7.3	[U]	6.89	24.6	15	12	1.55	
Canada	R	6.6	[U]	6.64	10.2		32		
Canada	R	6.9	[U]	6.75	15		40		
Taiwan	R	6.4	[U]	6.37	4		20		
USA, CA	RL-R	6	[U]	6.13	1.73	9	16		
USA, CA	R	5.8	[U]	5.87	0.73		8		
Taiwan	R	7.8	[U]	7.33	110		48		
Japan	LL-R	5.3	[U]	5.51	0.21		7		
USA, CA	R	5.7	[U]	6.01	1.04		5		
Australia	R	6.3	[U]	6.26	2.8	10.2	13	1.3	0.63

Location	Slip Type	Ms		M	Seismic Momentt (1026 dyne-cm)	Rupture Length (km)		Displacement(m)	
						Surface	Subsurface	Maximum	Average
Australia	R	6.7	[U]	6.58	8.2	16	19	1.9	0.93
Canada	R	5.8	[U]	5.84	0.64		23		
USA，CA	RL-R	7.1	[U]	6.92	267		40		
Algeria	R	5.7	[U]	5.98	1.04	4.0	15	0.13	
Canada	R	6.3	[U]	5.98	1.04	10	10	2.0	0.8
Japan	R	5.1	[U]	5.28	0.092		6.5		
USA, Oregon	R	5.4	[U]	4.77	0.016		5.5		
Taiwan	R	7.6				100		11	2
southern coastal Peru	R			8.4					
California	SS-R	6.5							
Japan	R	6.8				1			
China	R	7.9				200		9	
Chile	R	7.6				130 km			
China	RL-R	7.3				32		5	

委員意見回覆

審查意見	審查意見答覆與處理情形
1. 試驗資料成果請依 normalized data 來處理。	委員的意見是很好的建議，本報告已有的成果會盡量以 normalized data 來呈現，如 3.2.1 小節第二段及圖 3-2-10 至圖 3-2-13 所呈現之結果。
2. 參數空間變異分析請考慮使用 semivariogram。	目前是用兩兩對比相關係數的方式表示。委員的建議是很好的方向，已著手進行，如有成果將於明年度之期中報告中呈現。
3. 請加強說明砂箱離心機試驗之設定（包括邊界條件等）。	詳見報告 2.3.2 小節，已詳列離心機試驗之試驗砂箱設計，包含砂箱尺寸、機械趨動設備、位移方向、最大位移量限制及不同加速度下(g 值)所代表之原型尺寸，另外也詳列試驗用砂土及黏土之性質。
4. 請說明斷層傾角變化（由小至大、由大至小）對地表變形的影響。	感謝委員給予的意見，已將斷層傾角變化對地表變形影響的比較新增至 3.3.2.Ⅱ小節。由比較結果可以得到斷層傾角對正斷層覆土中剪切帶之影響，當斷層傾角越小時剪切帶越寬，並越提早發展出反向斷層。
5. 現地觀察、砂箱試驗及數值模擬，除說明變形帶之發展外，亦請說明各個破裂面之發展，並指出主破裂面 0.。	感謝委員給予的意見，已修定報告，增加如何在現地觀察、砂箱試驗及數值模擬中觀察應變集中帶之發展的方法學，如第 2.5 小節。
6. 結構物補強減災方式請加強考慮主破裂面。	感謝委員給予的意見，已將結構物補強之模擬結果新增至 3.3.2.Ⅳ小節。
7. 山腳斷層係 transtension，請說明如何在 tension 試驗中探討 transtension 之地表變形。	Transtension 有橫移分量，是一 3D 問題，本計畫第三年度會針對橫移斷層進行相關研究。
8. 請檢視台北盆地之岩心，由不同深度之構造，了解山腳斷層之正斷作用在不同深度之應力狀況及變化。	委員之意見甚是，本研究透過岩心資料，整理了三腳斷層在基盤分佈的特性，詳細請見 3.1.1 小節。
9. 請收集全世界正斷層活動中，一次陷落最大為多少公尺？斷層傾角、地震規模及災害情況（包破結構物破壞型式）為何？並說明位在何種構造環境之正斷層。	根據 Wells 及 Coppersmith(1994)發表的歷史地震斷層的資料(詳見附錄)，加上我們收集到的在 1994 年以後至今的地震斷層的資料，得知歷史地震正斷層的最大錯動量約為 8 公尺左右，歷史地震斷層的最大錯移量則以橫移斷層的 12 公尺居

	冠。而歷史地震正斷層最大地震矩規模則為 7.6，歷史地震斷層的最大地震矩規模，還是以橫移斷層居冠，約為 8.6。 正斷層會形成於怎麼樣的地質環境，我們就大尺度和中尺度來說明，小尺度的正斷層基本上不會造成具破壞性的地震，先行忽略。就大尺度來看，正斷層常出現在受伸張的地殼大地構造環境裡，如地殼擴張的中洋脊附近，大陸地殼中的裂谷(rift)處、熱點(hotspots)所在的地區、弧後盆地(back-arc)等。就中尺度而言，如形成在大規模橫移斷層彎曲(bend)的伸張 duplex 處，亦即形成 transtension 的地區，這是因空間上的調協所造成，或是在大型的背斜構造的頂部，因岩石受撓曲所致。
10. 「整體構想」一節和工作計畫書相似，請依工作進展更新修正。	感謝委員提醒，已修正於期末報告中。
11. 封面格式請加入中程計畫名稱並統一格式。	感謝委員提醒，已修正於期末報告中。
12. p.18、19 有關日本 Fukushima 地區活動正斷層的描述與圖的編號有誤，請修正。	感謝委員提醒，已修正於期末報告中。
13. 圖 2-1-9~12 圖說中位置點標示於圖 2-1-3 有誤，請修正。	感謝委員提醒，已修正於期末報告中。
14. p.18 倒數第 5 行「兩斷層」所指為何，請說明。	「兩斷層」係指造成日本 411 地震的其中兩條斷層：Itozawa 東斷層及 Itozawa 西斷層，其位置請詳見圖 2-1-7。
15. p.113 法規整理建議加上法規最新修正日期。	感謝委員提醒，已修正於期末報告中。
16. p.113「山坡地開發建築管理辦法」已修改為「山坡地建築管理辦法」，原「山坡地開發建築管理辦法」條文內容已廢止。	感謝委員提醒，已修正於期末報告中。