經濟部

經濟部中央地質調查所報告第 9 號
委辦計畫編號（102-5226904000-02-01）

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(3/4)

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 102 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(3/4)

102 年度成果報告

計畫主持人：林銘郎

協同主持人：李崇正

研究員：黃文正、黃文昭

委託機關：經濟部中央地質調查所

執行機關：國立臺灣大學、國立中央大學

中華民國 102 年 12 月

目錄

目錄 ..... **I**

圖目錄 ..... **III**

表目錄 ..... **XI**

摘要 ..... **XIII**

ABSTRACT ..... **XIV**

第一章、前言 **1**

1.1 計畫背景 1
1.2 研究目的 6
1.3 整體構想 6

第二章、研究方法 **10**

2.1 文獻回顧 10
2.1.1 國外橫移斷層案例 10
2.1.2 國內橫移活動斷層 13
2.1.3 橫移斷層砂箱實驗 13
2.1.4 橫移斷層數值模擬 18
2.1.5 橫移斷層與結構物互制行為 20
2.1.6 斷層沿線結構物補強或減災方式 24
2.2 統計回歸 29
2.3 砂箱實驗 35
2.3.1 離心機介紹 35
2.3.2 離心模型試驗實驗材料性質及試體土層製作 41
2.3.2.1 試驗用石英矽砂及試體砂土層 41
2.3.2.2 人工黏土及試體黏土層 43
2.3.2.3 砂黏土互層試體 44
2.3.2.4 截至目前已完成試驗的試驗編號及試驗條件 45
2.3.3 離心機模型砂箱實驗規畫 50
2.3.4 橫移斷層砂箱 52
2.3.4.1 砂箱尺寸 52
2.3.4.2 實驗材料性質 55
2.4 數值模擬 57
2.4.1 離心機砂箱模型 57
2.4.2 橫移斷層砂箱模型 58
2.4.3 山腳斷層現地模型 59

2.4.4 微觀參數與物理實驗校核 64
第三章、研究成果 69
3.1 現地調查 69
3.1.1 國內橫移斷層案例 69
3.1.1.1 米崙斷層槽溝開挖 70
3.1.1.2 米崙斷層現地調查-東華大學地表破裂跡 71
3.1.1.3 米崙斷層鑽探資料整理 82
3.1.1.4 新化斷層槽溝開挖與地表破裂跡 89
3.1.2 國外橫移斷層案例(黑沃斷層) 97
3.1.2.1 黑沃斷層之位置與歷史地震 97
3.1.2.2 黑沃斷層區域供水系統改善計畫 98
3.1.2.3 美國加州地質調查所活動斷層條帶圖 100
3.2 砂箱實驗 112
3.2.1 逆、正斷層離心模型試驗成果 112
3.2.1.1 如何在逆、正斷層砂箱實驗中定義剪切帶及主破裂面 112
3.2.1.2 純砂土逆斷層無基礎離心模型試驗成果 112
3.2.1.3 純砂土逆斷層與剛性淺基礎版的互制效應離心模型試驗成果 113
3.2.1.4 純砂土正斷層無基礎離心模型試驗成果 115
3.2.1.5 純砂土正斷層與剛性淺基礎版的互制效應離心模型試驗成果 116
3.2.1.6 純黏土逆、正斷層離心模型試驗成果 116
3.2.1.7 砂黏土互層心逆、正斷層離心模型試驗成果 117
3.2.2 橫移斷層實驗結果 160
3.3 數值模擬 165
3.3.1 微觀參數取得 165
3.3.2 橫移斷層數值模擬結果 168
3.3.3 如何在逆、正斷層數值模擬中定義剪切帶及主破裂面 170
3.3.4 正逆斷層數值模擬結果 173
3.3.4.1 無生長斷層之逆、正斷層 173
3.3.4.2 生長斷層 188
第四章、結論與建議 196
4.1 現地調查 196
4.2 砂箱實驗 196
4.3 數值模擬 198
參考文獻 200

圖目錄

圖 1.1.1 台灣活動斷層分布圖 3
圖 1.1.2 簡單右剪(RIGHT SIMPLE SHEAR)下的棕櫚樹構造(PALM TREE STUCTRUES)示意圖 5
圖 1.3.1 三種研究方法間之整合關係 8
圖 1.3.2 本研究流程圖 9
圖 2.1.1 各類橫移斷層在大地構造上與板塊的相互關係 11
圖 2.1.2 歷史地震斷層彙整資料 12
圖 2.1.3 新化斷層槽溝開挖剖面 15
圖 2.1.4 砂箱試驗中乾砂受橫移斷層錯動的演化 15
圖 2.1.5 俯視圖可觀察的地表變形特徵 16
圖 2.1.6 俯視圖可觀察的地層變形特徵 16
圖 2.1.7 雷氏剪裂在三度空間上具有螺旋狀之幾何型貌 17
圖 2.1.8 橫移斷層系統在橫剖面下的特徵 17
圖 2.1.9 分離元素法探討斷層剪動 19
圖 2.1.10 分離元素法探討斷層剪動雷氏剪裂面 19
圖 2.1.11 相同的滑移距離對不同材料其變形行為不同 19
圖 2.1.12 斷層錯動引致上覆土層與結構物互制之數值模擬示意圖 23
圖 2.1.13 結構物之受力分佈情形受其與斷層之相對位置之影響 23
圖 2.1.14 結構及基礎設計與斷層線附近變形特性 25
圖 2.1.15 使用地工格網進行道路加勁之工程處置方式 26
圖 2.1.16 不同勒性覆土層在不同垂直位移下之地版彎矩值分佈圖 27
圖 2.1.17 筏式基礎厚度與樓地板彎矩及垂直變位關係圖 28
圖 2.1.18 連續壁對樓地板彎矩值及垂直變位之影響關係圖 29
圖 2.2.1 標準貫入試驗值直方圖與分佈頻率圖 34
圖 2.2.2 自相關函數類型 34
圖 2.3.1 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 38
圖 2.3.2 離心模型、數值或分析模型及現場全尺度試驗相互關係 38
圖 2.3.3 中大地工離心機全景 39

圖 2.3.4 (A)斷層錯動模擬試驗箱；(B)地表剖面掃瞄台車 39
圖 2.3.5 離心機斷層錯動試驗之座標及試驗配置圖 40
圖 2.3.6 掃瞄台車在正逆斷層錯動試驗過程中所量測之地表剖面 41
圖 2.3.7 試驗土樣之粒徑分佈圖 47
圖 2.3.8 裝置於試驗箱上之移動式霣降儀 48
圖 2.3.9 人工黏土的夯實曲線及十字片剪力強度關係 48
圖 2.3.10 人工試體黏土層(G/C=40%)之準備過程 49
圖 2.3.11 人工試體黏土層(G/C=34%)之準備過程 49
圖 2.3.12 橫移斷層砂試驗模型 53
圖 2.3.13 (A)砂箱模型鋪沙狀況及(B)設置於雷射掃描儀 54
圖 2.3.14 雷射掃描測距系統 54
圖 2.3.15 砂箱模擬左移斷層 54
圖 2.3.16 越南石英砂之相對密度和抗剪角的關係 56
圖 2.3.17 越南石英砂之相對密度和抗剪角的關係 56
圖 2.4.1 數值模擬所使用的顆粒與試驗石英矽砂的篩分析曲線之比較 61
圖 2.4.2 離心機正逆斷層數值模擬之模型尺寸及分層 62
圖 2.4.3 橫移斷層數值模擬之模型尺寸 62
圖 2.4.4 橫移斷層數值模擬砂箱之分層示意圖 62
圖 2.4.5 五股剖面鑽孔位置圖 63
圖 2.4.6 五股剖面鑽井資料 63
圖 2.4.7 山腳斷層現地尺寸數值模擬流程及尺寸 64
圖 2.4.8 微觀模式組成率與巨觀模式組成律間的關係 68
圖 2.4.9 自重壓密數值模擬所計算之沈陷量與離心模型量測沈陷量之比較 68
圖 2.4.10 自重壓密不同 M 值，數值模擬之沈陷量與離心模型量測沈陷量之比較 68
圖 3.1.1 米崙斷層條帶地質圖 72
圖 3.1.2 1951 年縱谷斷層地震序列 73
圖 3.1.3 1951 年花蓮地震於花蓮七星潭民房內隆起 40 公分(鄭世楠提供) 73
圖 3.1.4 1951 年花蓮地震而出露之米崙地震斷層露頭，隆起高達 1.2 公尺(鄭世楠提供) 73
圖 3.1.5 1951 年花蓮地震造成水平錯移高達 2 公尺(鄭世楠提供) 74

圖 3.1.6 1951 年地震米崙斷層的地表破裂圖 74
圖 3.1.7 1951 年地震地表變形帶位置 75
圖 3.1.8 米崙斷層機場槽溝開挖結果，剖面(南牆)未有斷層通過的跡象 76
圖 3.1.9 花崗山一號與二號槽溝位置圖 76
圖 3.1.10 花崗山一號與二號槽溝位置照片 77
圖 3.1.11 花崗山一號槽溝北牆 77
圖 3.1.12 花崗山二號槽溝北牆 77
圖 3.1.13 米崙斷層推測地表破裂跡與東華大學美崙校區位置圖 78
圖 3.1.14 東華大學美崙校區五守樓 79
圖 3.1.15 東華大學美崙校區體育館 79
圖 3.1.16 東華大學美崙校區五守樓裂隙情況 80
圖 3.1.17 東華大學美崙校區五守樓裂隙方向統整玫瑰圖 80
圖 3.1.18 東華大學美崙校區五守樓一樓左右兩側廁所外牆上裂隙情況 81
圖 3.1.19 東華大學美崙校區體育館外圍斜坡上地表裂隙 81
圖 3.1.20 東華大學美崙校區體育館外圍牆上裂隙 81
圖 3.1.21 花崗國中建築工地現勘照片 82
圖 3.1.22 米崙斷層線以及臨近工程鑽孔相對位置圖 86
圖 3.1.23 米崙斷層臨近工程鑽孔標準貫入值與高程關係 87
圖 3.1.24 以彈性解推估現地彈性模數隨高程關係圖 87
圖 3.1.25 以彈性解推估現地波松比隨高程關係圖 88
圖 3.1.26 以經驗公式推估現地楊氏模數隨高程關係圖 88
圖 3.1.27 以經驗公式推估現地摩擦角隨高程關係圖 88
圖 3.1.28 1946 年台南地震的地表破裂 92
圖 3.1.29 新化斷層條帶地質圖 93
圖 3.1.30 1946 年台南地震於新化地區的地表變形 94
圖 3.1.31 那拔林 2 號槽溝 94
圖 3.1.32 那拔林 3 號槽溝 95
圖 3.1.33 那拔林 4 號槽溝 95
圖 3.1.34 新化斷層畜產試驗所內的地面破裂 96

圖 3.1.35 黑沃斷層地表跡位置圖 101
圖 3.1.36 聖安地列斯斷層系統(SAN ANDREAS FAULT SYSTEM)與黑沃斷層 102
圖 3.1.37 北美大陸西岸與黑沃斷層沿線地質圖 102
圖 3.1.38 黑沃斷層地表跡與伯克萊大學體育場 103
圖 3.1.39 黑沃斷層沿線槽溝開挖位置 103
圖 3.1.40 黑沃斷層沿線開挖槽溝垂直剖面圖 104
圖 3.1.41 HETCH HETCHY REGIONAL WATER SYSTEM 配置圖 105
圖 3.1.42 BDPLS 位置圖 105
圖 3.1.43 包覆於輸水管之可滑動式混凝土箱涵設計圖 106
圖 3.1.44 可滑動式混凝土箱涵之模型試驗 106
圖 3.1.45 BALL JOINT 示意圖 107
圖 3.1.46 BALL JOINT 試驗相片 107
圖 3.1.47 SLIP JOINT 示意圖 107
圖 3.1.48 BDPL3 號管線於 TRACE B 處的設計平面圖 108
圖 3.1.49 BDPL4 號管線於 TRACE B 處的設計平面圖 108
圖 3.1.50 BDPLS 施工相片 108
圖 3.1.51 加州政府保育部地震(活動)斷層條帶圖查詢系統 109
圖 3.1.52 黑沃區方形(HAYWARD QUADRANGLE)管理地圖 109
圖 3.1.53 地震斷層條帶截取圖及圖例說明 110
圖 3.1.54 加州柏克萊大學區黑沃斷層斷層跡 111
圖 3.2.1 在不同試驗 G 值情況下，進行逆斷層試驗後地下土層變形剖面 118
圖 3.2.2 逆斷層地下染色砂層變位剖面的數位化(80GRTEST23) 119
圖 3.2.3 正斷層地下染色砂層變位剖面及斷層跡的發展及演化 119
圖 3.2.4 在不同 G 值進行砂試體逆斷層錯動試驗後之破壞照片及比較 121
圖 3.2.5 在不同 G 值進行砂試體逆斷層錯動試驗，數位化後地下染色砂次層變位及主破裂面 121
圖 3.2.6(A)-(K) 1G 逆斷層試驗條件，不同垂直錯動距離，斷層破裂面發展情形 122
圖 3.2.7 在 80G 逆斷層試驗條件，垂直錯動距離 4M(R=25%)，不同覆土層厚度(16M 及 8M)，破裂面發展比較 127
圖 3.2.8 在 80G 逆斷層試驗條件，垂直錯動距離 4M(R=25%)，不同相對密度砂土試體破裂面發展比較 ... 128

圖 3.2.9 剛性基礎版基本性質及照片 129
圖 3.2.10 不同試驗，剛性淺基礎版與逆斷層跡出露地表相對位置關係示意圖 130
圖 3.2.11 逆斷層試驗不同垂直錯動量，B 基礎版在不同 S/B 的情況下，地表變形剖面之比較 131
圖 3.2.12 逆斷層試驗不同垂直錯動量，B 基礎版在不同 S/B 情況下，地表變形剖面之比較 131
圖 3.2.13 逆斷層試驗不同垂直錯動量，B 基礎版在不同 S/B 情況下，基礎版旋轉角及水平變位之比較 132
圖 3.2.14 921 集集地震建築物受到逆斷層錯動土壤被頂升至二層樓高之景象 133
圖 3.2.15 逆斷層試驗，B 基礎版在不同 S/B 情況下，比較淺基礎版對斷層跡出露地表位置及破裂範圍 134
圖 3.2.16 逆斷層試驗，B 基礎版在不同 S/B 情況下，比較淺基礎版對斷層跡出露地表位置及破裂範圍 134
圖 3.2.17 逆斷層試驗不同垂直錯動量，不同載重基礎版相同 S/B=0.69 情況下，地表變形剖面之比較 135
圖 3.2.18 逆斷層試驗不同垂直錯動量，不同載重基礎版相同 S/B=0.69 情況下，地表變形剖面之比較 136
圖 3.2.19 逆斷層試驗不同垂直錯動量，不同載重基礎版相同 S/B=0.69 情況下，基礎旋轉角及水平位移之比較 136
圖 3.2.20 逆斷層試驗垂直錯動量 R=25%時，不同載重基礎版在相同 S/B=0.69 情況下，斷裂跡出露地表情形。(A)B 基礎(Q=52.9KPA)；(B)C 基礎(Q=86.0KPA) 137
圖 3.2.21 逆斷層試驗在相同 S/B=0.69 情況下，不同載重淺基礎對斷層跡出露地表位置及破裂範圍比較 .. 137
圖 3.2.22 逆斷層試驗在相同 S/B=0 情況下，不同載重淺基礎對斷層跡出露地表位置及破裂範圍比較 138
圖 3.2.23 逆斷層試驗在相同 S/B=0 情況下，不同寬度淺基礎版對斷層跡出露地表位置及破裂範圍比較 ... 138
圖 3.2.24 逆斷層試驗在相同 S/B=0 情況下，不同寬度的淺基礎版旋轉角、水平位移之比較 139
圖 3.2.25 逆斷層試驗，在相同 S/B=0 及相同載重情況下，不同寬度的淺基礎版試驗後地表面斷層跡出露景象的比較 139
圖 3.2.26 逆斷層試驗，在相同 S/B=0 及相同載重情況下，不同寬度的淺基礎版試驗後及自由場地下斷層跡出露景象的比較 140
圖 3.2.27 1G 試驗條件下正斷層錯動時破裂跡之發展及演化 141
圖 3.2.28 正斷層錯動時在不同垂直錯動量下地表變位剖面及地下破裂跡 143
圖 3.2.29 不同試驗，剛性淺基礎版與正斷層跡出露地表相對位置關係示意圖 143
圖 3.2.30 為正斷層錯動試驗不同垂直錯動量，自由場(1G 及 80G 情況下)及 B 基礎版在 S/B=1 情況下，地表變形剖面之比較 144
圖 3.2.31 正斷層錯動試驗不同垂直錯動量，B 基礎版在 S/B=0 及 S/B=1 處，地表變形剖面之比較 144
圖 3.2.32 正斷層垂直錯動 5CM，自由場及 B 基礎版位於 S/B=1 處，地下破裂跡的比較 145
圖 3.2.33 正斷層(70G)垂直錯動 5CM，B 基礎版位於 S/B=0 處，地下破裂跡的比較。(A)S/B=0(B)自由場 ... 145

圖 3.2.34 正斷層(70G)垂直錯動 5CM，B 基礎版位於 S/B=1 處，地下破裂跡的比較。(A)S/B=1(B)自由場 ...146
圖 3.2.35 正斷層(70G)垂直錯動量 5CM 後，B 基礎版座落於 S/B=0 及 S/B=1 處，地下破裂跡的比較.....146
圖 3.2.36 正斷層(70G)不同垂直錯動量下，B 基礎版座落於 S/B=0 及 S/B=1 處，旋轉角水平位移及垂直位移之比較 147
圖 3.2.37 正斷層在不同垂直錯動量，自由場及 B 基礎版座落於 S/B=1 處，地表變位剖面與基礎版傾斜及位移的情形地下破裂跡的比較.....147
圖 3.2.38 生長斷層與非生長斷層破裂跡之比較(A)非生長斷層(B)生長斷層第一階段(C)一層生長斷層.....148
圖 3.2.39 不同剪力強度純黏土試體正斷層錯動試驗結果比較 149
圖 3.2.40 不同剪力強度純黏土試體正斷層錯動試驗，地表剖面結果比較 150
圖 3.2.41 不同剪力強度純黏土試體正斷層錯動試驗，地表剖面結果比較 151
圖 3.2.42 不同剪力強度純黏土試體逆斷層錯動試驗結果比較 152
圖 3.2.43 不同剪力強度純黏土試體逆斷層錯動試驗，地表剖面結果比較 153
圖 3.2.44 不同剪力強度純黏土試體及砂試體正斷層錯動試驗，地表剖面結果之比較 153
圖 3.2.45 不同剪力強度純黏土試體及砂試體逆斷層錯動試驗，地表剖面結果之比較 154
圖 3.2.46 黏土砂土互層試體及純黏土試體，正斷層錯動試驗，地表剖面結果之比較 154
圖 3.2.47 黏土砂土互層試體及純黏土試體，正斷層錯動試驗，地表剖面結果之比較 155
圖 3.2.48 黏土砂土互層試體及純砂試體，正斷層錯動試驗，地下破裂跡結果之比較 155
圖 3.2.49 黏土及砂土互層試體，正斷層錯動試驗，砂及黏土界面之變形剖面照片 156
圖 3.2.50 黏土砂土互層試體，正斷層錯動試驗，砂及黏土界面之變形高程剖面 156
圖 3.2.51 黏土砂土互層試體，逆斷層錯動試驗，砂及黏土界面之變形高程剖面 157
圖 3.2.52 黏土砂土互層試體，逆斷層錯動試驗，砂及土界面之地下破裂跡之比較 157
圖 3.2.53 黏土砂土互層試體，逆斷層錯動試驗，砂及黏土界面之變形剖面照片 158
圖 3.2.54 黏土砂土互層試體，逆斷層錯動試驗，砂及黏土界面之變形高程剖面 158
圖 3.2.55 砂土及黏土砂土互層試體，逆斷層錯動試驗，地下破裂跡之比較 159
圖 3.2.56 橫移斷層砂箱實驗地表高程資料.....161
圖 3.2.57 橫移斷層砂箱實驗 PIV 影像分析 161
圖 3.2.58 橫移砂箱試驗之地表破裂跡歷程.....163
圖 3.2.59 橫移砂箱試驗之雷射位移掃描計掃描結果.....163
圖 3.2.60 橫移砂箱試驗之地表破裂跡發展影響範圍.....164

圖 3.2.61 砂箱試驗第七階段地表破裂跡與影像疊合圖 164
圖 3.3.1 直剪試驗數值模擬下微觀與巨觀摩擦角之關係 166
圖 3.3.2 橫移斷層數值模擬結果(Y 方向位移) 169
圖 3.3.3 橫移斷層數值模擬結果(Z 方向位移) 169
圖 3.3.4 數值模擬逆斷層錯動地下破裂跡之決定 171
圖 3.3.5 生長斷層數值模擬中以人工判識圈繪剪切帶 171
圖 3.3.6 在生長斷層數值模擬中設置監測點 172
圖 3.3.7 生長斷層數值模擬中以自動判識圈繪剪切帶(建議橢圓率門檻值 1.5，$\Gamma = 41\%$) 172
圖 3.3.8 為利用 PFC2D 在不同 G 值(1G,40G,80G)下，進行逆斷層錯動試驗的數值模擬，在不同的垂直錯動比(R)計算所得之地表剖面與離心模型試驗結果之比對 180
圖 3.3.9 利用 PFC2D 在不同 G 值(1G,40G,80G)下，進行逆斷層錯動試驗的數值模擬，計算所得之地下破裂跡與離心模型試驗地下破裂跡結果之比對 181
圖 3.3.10 80G 逆斷層離心模型試驗在不同的垂直錯動比(R)之地表變位剖面及地表變位剖面的斜率 182
圖 3.3.11 GOMPERTZ 函數三個變數的改變對曲線形狀及大小的影響示意圖 183
圖 3.3.12 利用 GOMPERTZ 函數來描述地表變形剖面及斜率之示意圖 184
圖 3.3.13 逆斷層離心物理模型試驗與 GOMPERTZ 之回歸比較圖 184
圖 3.3.14 逆斷層錯動後地表影響範圍之示意圖 185
圖 3.3.15 求取地表影響範圍流程圖 185
圖 3.3.16 L_{X1}/H MATLAB SFTOO 圖 186
圖 3.3.17 L_{X2}/H MATLAB SFTOOL 圖 186
圖 3.3.18 正斷層影響範圍圖 186
圖 3.3.19 正斷層影響範圍(A)L_{FB} 與斷層傾角關係，(B)L_{TOT} 與斷層傾角關係 187
圖 3.3.20 MATLAB SFTOOL 回歸示意圖 187
圖 3.3.21 169 層生長斷層數值模擬所使用之顆粒數與運行時間 190
圖 3.3.22 比較顆粒勁度全部一樣與隨深度改變之生長斷層數值模擬 190
圖 3.3.23 169 層生長斷層數值模擬 191
圖 3.3.24 169 層生長斷層數值模擬結果 192
圖 3.3.25 169 層生長層錯動時所形成的剪切帶(橢圓率門檻值 1.5) 192
圖 3.3.26 169 層生長層錯動時所形成的剪切帶(橢圓率門檻值 1.1) 193

圖 3.3.27 169 層生長層錯動時所形成的剪切帶(橢圓率門檻值 1.05)..... 193
圖 3.3.28 169 層生長層錯動時所形成的剪切帶(橢圓率門檻值 1.01)..... 194
圖 3.3.29 與 169 層生長斷層比對之正斷層(相同微觀參數及下盤覆土厚度)..... 194
圖 3.3.30 169 層生長斷層及正斷層數值模擬之顆粒接觸力(CONTACT FORCE)分佈情形 195

表目錄

表 1.1.1 台灣活動斷層參數資料表.....4
表 2.1.1 橫移斷層的分類.....11
表 2.1.2 世界聞名的重大橫移斷層.....12
表 2.1.3 斷層作用引致上覆土層變形行為對建築物影響文獻摘錄.....21
表 2.1.4 斷層作用引致上覆土層變形行為對地下結構物影響文獻摘錄.....22
表 2.1.5 建築物可容許角變量與破壞程度.....24
表 2.2.1 常見土壤力學及一般物性參數變異係數.....32
表 2.2.2 台灣活動斷層相關資料一覽表.....33
表 2.2.3 圈選範圍 100 及 500 公尺下之對應統計區及人口數.....33
表 2.2.4 圈選範圍 100 及 500 公尺下之影響人口指數值.....34
表 2.3.1 離心模型與原型之相似性比較.....37
表 2.3.2 試驗土樣之基本物理性質.....45
表 2.3.3 自計畫第一年以來已完成的試驗編號及試驗條件.....45
表 2.3.4 今年完成的試驗編號及試驗條件.....50
表 2.3.5 越南石英砂物理參數實驗結果.....56
表 2.4.1 PFC2D 模擬離心機砂箱模型的微觀參數.....60
表 2.4.2 PFC2D 模擬橫移斷層砂箱模型的微觀參數.....60
表 2.4.3 PFC2D 模擬山腳斷層現地模型的微觀參數.....61
表 3.1.1 東華大學五守樓及體育館裂隙資料統整.....72
表 3.1.2 米崙斷層附近工程鑽孔列表.....85
表 3.1.3 米崙斷層南段(市區部分)建議簡化土層分層.....85
表 3.1.4 米崙斷層北段(機場附近)建議簡化土層分層.....86
表 3.1.5 BDPLS 相關設計區域參數.....101
表 3.2.1 剛性淺基礎版模型試驗的試驗編號及試驗條件.....120
表 3.2.2 模型剛性淺基礎版的尺寸及載重.....120
表 3.2.3 模型試驗配置.....160
表 3.2.4 部分國外砂箱試驗之比較.....160

表 3.3.1 考慮顆粒尺寸下無凝聚力材料之微觀參數與摩擦角之關係.....166
表 3.3.2 凝聚性材料之微觀輸入參數.....167
表 3.3.3 80GRTEST23GOMPERTZ 之回歸參數表.....176
表 3.3.4 角變量與建築物損壞程度(BJERRUM ^{A}).....177
表 3.3.5 L_{X1}/H(斷層傾角=60°).....177
表 3.3.6 L_{X2}/H(斷層傾角=60°).....178
表 3.3.7 L_{P}/H 影響長度.....179
表 3.3.8 L_{S}/H 影響長度.....179
表 4.3.1 平行鍵結模式模擬具凝聚力材料之微觀參數與力學參數關係表.....199
表 4.3.2 接觸鍵結模式模擬具凝聚力材料之微觀參數與力學參數關係表.....199

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(第三年度)的研究規劃裡橫移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，本研究選定米崙斷層與美國舊金山灣地土的黑沃斷層(Hayward Fault)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，本研究今年已進行 16 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，作為判斷建築物安全性的參考。

透過不同分析方法了解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 strike-slip faults is chosen as the main study subject during the third 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, Milun Fault in Taiwan and Hayward Fault in San Francisco 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

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，地表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，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。然而地盤錯動造成地表永久變形進而造成結構物受損的研究相對而言則是較少，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，其對基盤以上之土層變形(包括近地表之岩層與近代沖積物)、剪切帶在土層中發展情形及土層與結構物互制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。

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 1.1.1)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。

橫移斷層的部份，根據地質調查所的調查報告，在 33 條的活動斷層中，共有 11 條具走向錯移性質(圖 1.1.1)。本年度的國內研究目標為米崙斷層，相較於其他的橫移斷層，其地表跡鄰近於人口密度相對較高的花蓮市，以 1951 的花蓮地震為鑑，其屬具相當破壞潛能的危險性地震斷層。東部的幾條橫移斷層(米崙斷層、嶺頂斷層、瑞穗斷層及池上斷層)其深部可能為相連的斷層帶，亦即分隔菲律賓海板塊和歐亞板塊的縫合構造，若根據 Sylvester(1988)的分類，這應屬於板塊邊界轉形斷層，而在地表的這些斷層跡，應為這轉形斷層在簡單剪力作用搭配聚合的效應下，所形成的類似棕櫚樹的構造(palm tree structure，見圖 1.1.2)。

針對 1999 年地質調查所的集集地震車籠埔斷層槽溝挖掘調查之研究結果顯示，每次大地震造成之地表破裂跡位置，是依其覆蓋在基盤之上覆土層厚度而定，當上覆土層厚度愈厚，材料性質愈疏鬆，斷層可能出露地表的位置變動性愈大。此外，斷層面並非單一的斷層面，而是有多條斷層面存在。由定年資料顯示，斷層作用具有重複性，故對於斷層帶附近建築物之安全性必須被特別注意。希望透過本計畫的研究，可瞭解斷層活動時地表附近可能的變形特性與影響範圍的大小，以提供研擬或修正地質法之子法中，有關活動斷層地質敏感區範圍劃設依據的參考。

編號	斷層名稱(性質)	編號	斷層名稱(性質)
1	山腳斷層(正移)	18	觸口斷層(逆移)
2	湖口斷層(逆移)	19	新化斷層(右移)
3	新竹斷層(逆移)	20	後甲里斷層(逆移)
4	新城斷層(逆移)	21	左鎮斷層(左移)
5	獅潭斷層(逆移)	22	小崗山斷層(逆移)
6	三義斷層(逆移)	23	旗山斷層(逆移)
7	大甲斷層(逆移)	24	潮州斷層(逆左移)
8	鐵砧山斷層(逆移)	25	恆春斷層(逆移)
9	屯子腳斷層(右移)	26	米崙斷層(左逆移)
10	彰化斷層(逆移)	27	嶺頂斷層(左逆移)
11	車籠埔斷層(逆移)	28	瑞穗斷層(逆左移)
12	大茅埔－雙冬斷層(逆移)		
13	九芎坑斷層(逆移)	29	奇美斷層(逆移)
14	梅山斷層(右移)	30	玉里斷層(左逆移)
15	大尖山斷層(逆右移)	31	池上斷層(逆左移)
16	木屐寮斷層(逆移)	32	鹿野斷層(逆移)
17	六甲斷層(逆移)	33	利吉斷層(逆移)

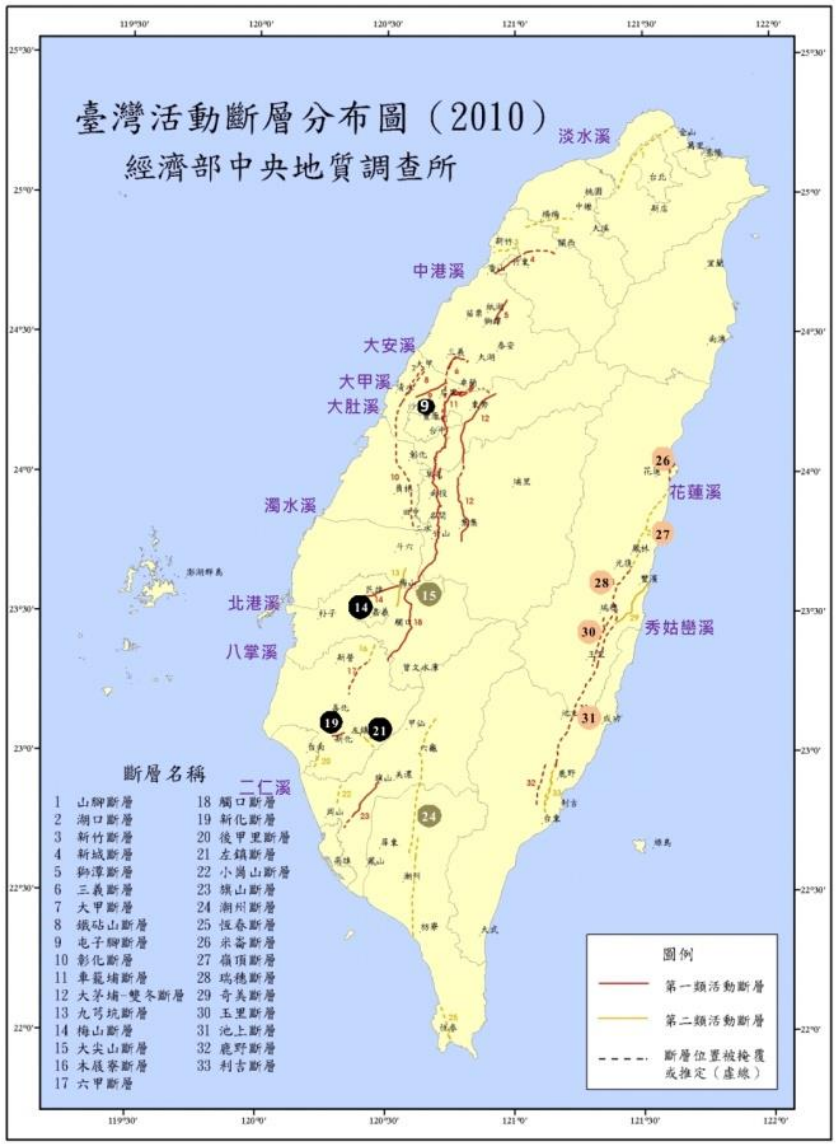


圖 1.1.1 台灣活動斷層分布圖(中央地質調查所，2010)

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) 平行斷層走向	GPS跨斷層水平速度變化(mm/yr) 垂直斷層走向	跨斷層垂直速度變化(mm/yr) 精密水準	跨斷層垂直速度變化(mm/yr) GPS	跨斷層垂直速度變化(mm/yr) 地質證據	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)
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) 平行斷層走向	GPS跨斷層水平速度變化(mm/yr) 垂直斷層走向	跨斷層垂直速度變化(mm/yr) 精密水準	跨斷層垂直速度變化(mm/yr) GPS	跨斷層垂直速度變化(mm/yr) 地質證據	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)
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 小崗山斷層	二	8h	逆移 s	45/東 n	+3.6 ± 2.8b	8.6 ± 3.1		9.7 ± 8.9b	4.4±0.6n ≧3.3±1.1w	14.1-20.2b	≧5.7±1.4x	(867)b	更新世晚期 s	(6.1)
23 旗山斷層	一	26*	逆移 s	50/東 n	+4.2 ± 5.7b	5.4 ± 7.2b	-3.6b	-1.2 ± 13.4b		<5.0 v			距今 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) 平行斷層走向	GPS跨斷層水平速度變化(mm/yr) 垂直斷層走向	跨斷層垂直速度變化(mm/yr) 精密水準	跨斷層垂直速度變化(mm/yr) GPS	跨斷層垂直速度變化(mm/yr) 地質證據	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)
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)

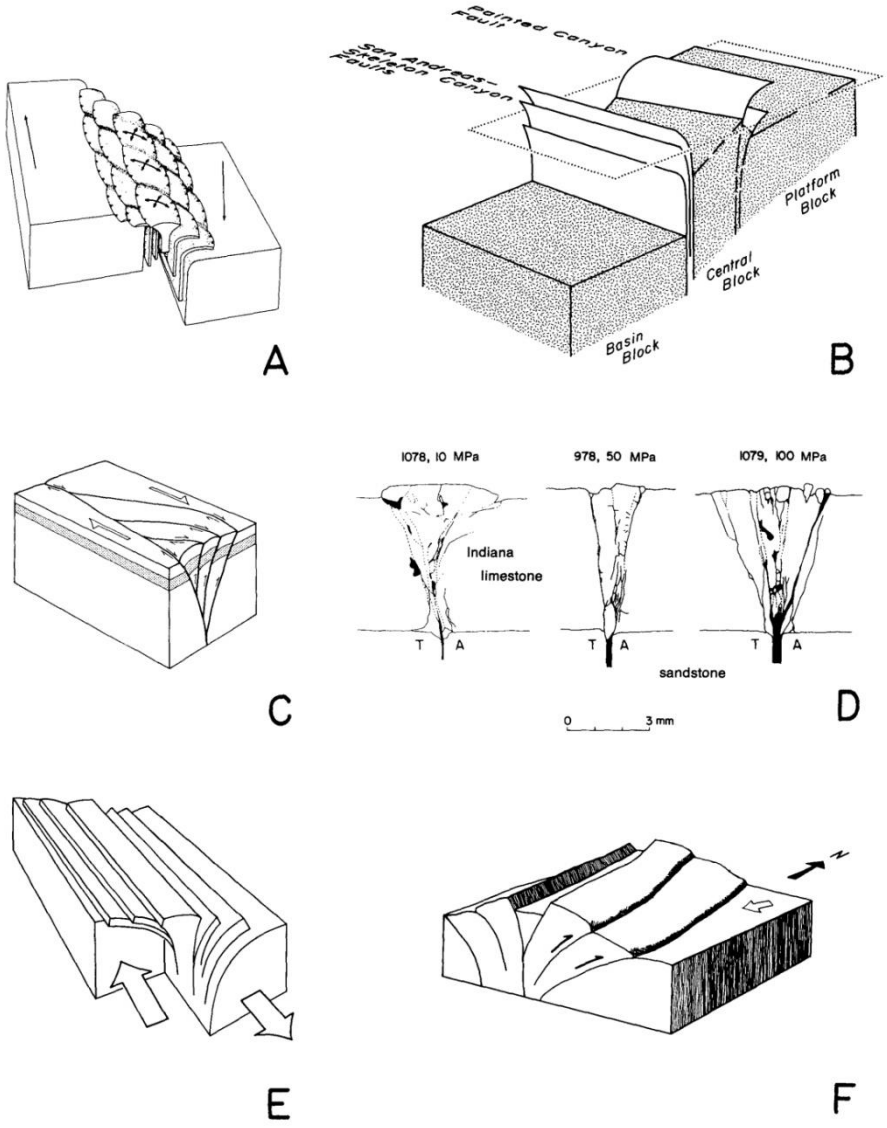


圖 1.1.2 簡單右剪(right simple shear)下的棕櫚樹構造(palm tree stuctrues)示意圖

(Sylvester, 1988)

1.2 研究目的

本研究計畫是為了減低和避免斷層活動所造成基盤以上覆土層的破壞或影響，規劃以現地調查為基礎，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：

1. 橫移斷層近地表變形特性之國內外相關文獻、案例蒐集，並針對槽溝開挖、地質鑽探、地殼變形觀測等調查結果與斷層變形行為之關係進行影響因子研析。
2. 進行 1 條橫移斷層(米崙斷層)沿線岩層之力學試驗分析，以獲得活動斷層兩側近地表岩層之分布與材料力學性質。
3. 利用斷層之現地特性、岩層分布及力學參數與結構物特性，進行可模擬重力環境的砂箱試驗與定量數值模擬分析，進行逆斷層與正斷層活動引致之變形量與岩層性質關係進一步研究，及對不同型式結構物之影響，進一步推求不同因子對影響範圍之關係。同時進行 1g 橫移斷層之砂箱模擬，以探討橫移斷層活動引致之變形量與岩層性質之關係。
4. 挑選 1 條其他斷層(Hayward Fault)進行橫移斷層活動影響因子模式之驗證、應用及修正。
5. 探討橫移斷層沿線岩層變化與不同類型建築物或結構物補強或減災之方式。

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 1.3.1 所示。為突破單一方法學所能提出結果之侷限性，本研究即採用此三大方法，分別進行基本行為觀察及定量分析，研究流程如圖 1.3.2 所示。茲分述如下：

- **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。

- **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。

- **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、PFC3D)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)。

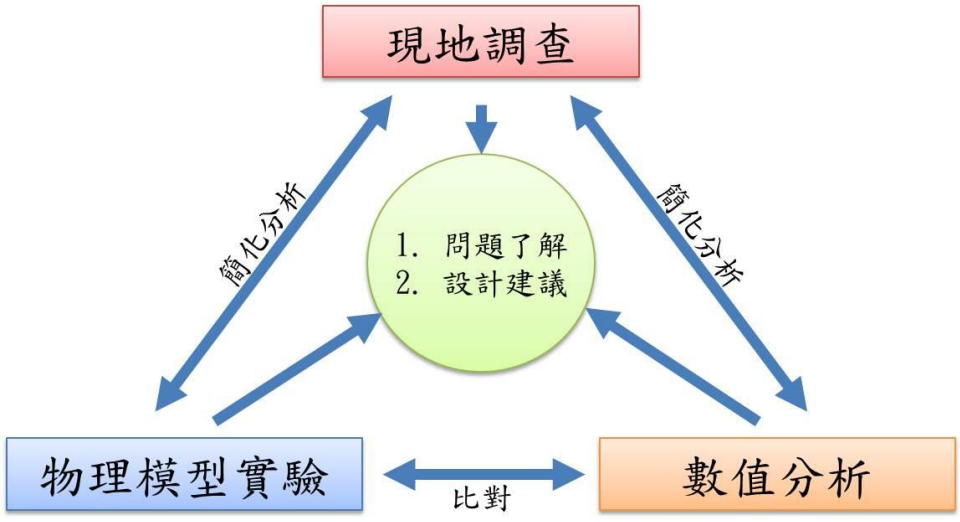


圖 1.3.1 三種研究方法間之整合關係

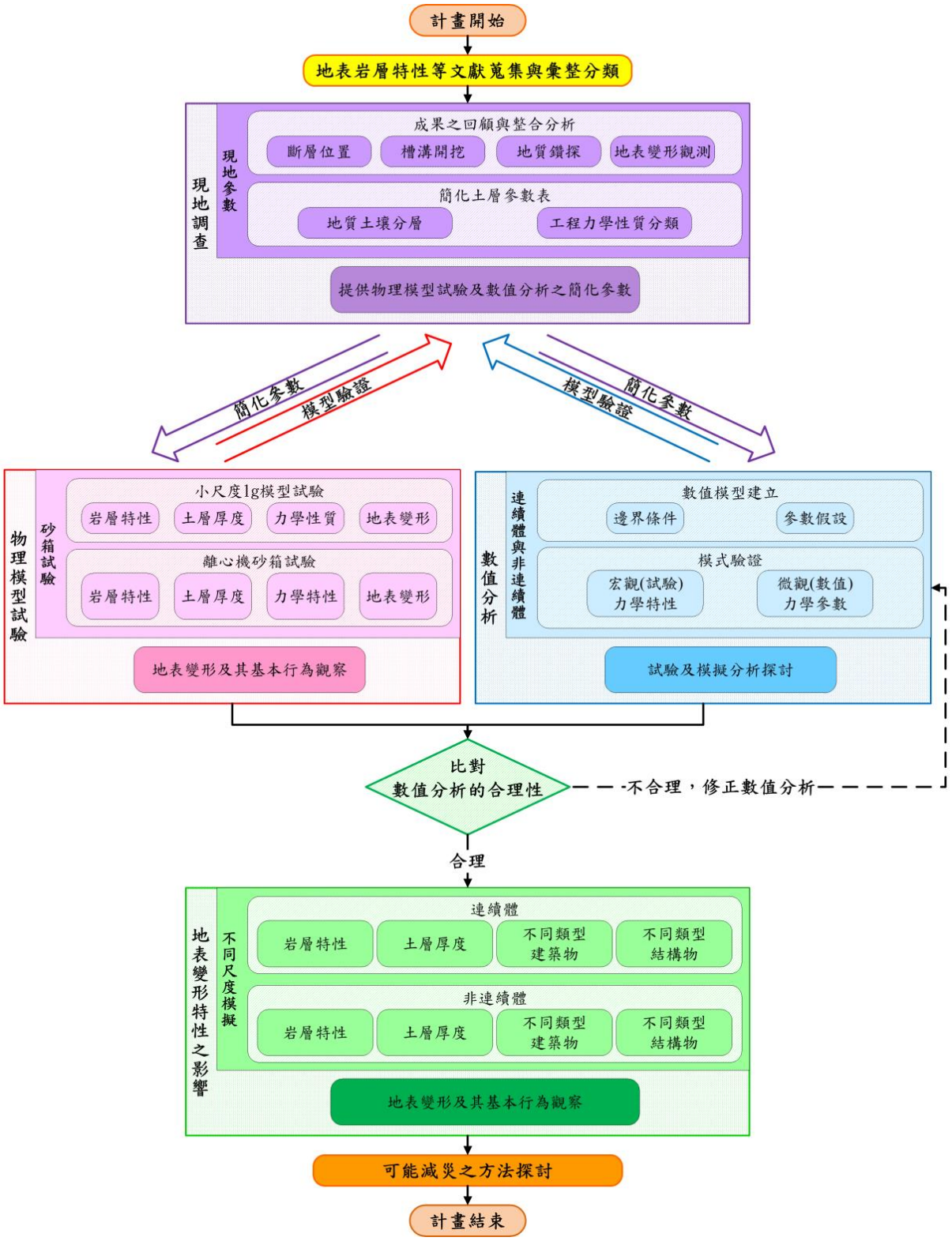

計畫開始
地表岩層特性等文獻蒐集與彙整分類
現地調查
現地參數
成果之回顧與整合分析
斷層位置
槽溝開挖
地質鑽探
地表變形觀測
簡化土層參數表
地質土壤分層
工程力學性質分類
提供物理模型試驗及數值分析之簡化參數
簡化參數
模型驗證
模型驗證
簡化參數
物理模型試驗
砂箱試驗
小尺度1g模型試驗
岩層特性
土層厚度
力學性質
地表變形
離心機砂箱試驗
岩層特性
土層厚度
力學特性
地表變形
地表變形及其基本行為觀察
數值分析
連續體與非連續體
數值模型建立
邊界條件
參數假設
模式驗證
宏觀(試驗)力學特性
微觀(數值)力學參數
試驗及模擬分析探討
比對數值分析的合理性
不合理，修正數值分析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

第二章、研究方法

2.1 文獻回顧

2.1.1 國外橫移斷層案例

Sylvester(1988)將橫移斷層分成處於相鄰板塊邊界上的轉形斷層(transform faults)及板塊內的橫衝斷層(transcurrent faults)兩大類，再根據所扮演的角色功能細分這兩大類。其中板塊邊界轉形斷層包括：中洋脊轉形斷層、板塊邊界轉形斷層及海溝相關聯橫移斷層等三種；板塊內橫衝斷層包括：板塊嵌入相關聯橫移斷層、撕裂斷層(tear fault)、轉渡斷層(transfer fault)及大陸地殼內的轉形斷層等四種。各種斷層的差異區別之描述見表 2.1.1，其在大地構造上與板塊的相互關係見圖 2.1.1 所示。

世界上知名的橫移斷層為數不少，如表 2.1.2 中收錄的 San Andreas 斷層、Denali 斷層、Great Summatra 斷層、阿爾泰金斷層(Altyn Tagh fault)、Dead Sea 斷層、NorthAnatolian 斷層及 Alpine 斷層等，其名聲顯赫之故，除其地表跡明顯且相當長外(幾乎皆超過一千公里)，其活躍性及在地震時活動所產生或可能產生的破壞力，更是令人震懾且戒慎恐懼。這也可由圖 2.1.2 的全世界至今之地震斷層彙整資料佐證，這資料包括 Wells 及 Coppersmith(1994)收錄及 1994 年以後至今由本研究團隊收錄到的。由圖中可知歷史地震斷層的最大錯移量及最大地震矩規模皆以橫移斷層為冠，分別為的 12 公尺及規模 8.6。這資料同時突顯了橫移斷層的潛在破壞力及對此類斷層研究的重要性。本年度所選定的國外案例，為聖安地列斯斷層系統(San Andreas fault system)中的黑沃斷層(Hayward Fault)，由於該斷層地表跡沿線結構物及各種管線系統的高密度分布情形，被視為舊金山港灣區，甚至可能是全美，對經濟及人員上，最具破壞潛能的危險性地震斷層(Graymer et al., 2005)。我們將在後面的章節中作更進一步的敘述與討論。

表 2.1.1 橫移斷層的分類

相鄰板塊間 (interplate)	板塊內部 (intraplate)
轉形斷層(Transform faults): A 界定板塊、切穿岩石圈及可充分地調節板塊間的活動。	橫衝斷層(Transcurrent faults): B 局限於地殼。
中洋脊轉形斷層: A_1 ● Displace segments of oceanic crust similar spreading vectors ● Present example: Owen, Romanche and Charlie Gibbs fracture zones	板塊嵌入相關聯橫移斷層: B_1 ● Separate continent-continent blocks which move with respect to one another because of plate convergence ● Present examples: North Anatolian fault (Turkey); Karakorum, Altyn tagh and Kunlun fault (Tibet)
板塊邊界轉形斷層: A_2 ● Join unlike plates which move parallel to the boundary between the plates ● Present examples: San Andreas fault(California), Chanman fault(Pakistnan), Alpine fault (New Zealand)	撕裂斷層(Tear faults): B_2 ● Accommodate differential displacement within a given allochthon(移置岩體) or between the allochthon and adjacent structural units ● Present examples: northwest- and northeast-striking fault in Asiak fold-thrust belt (Canada)
海溝相關聯橫移斷層: A_3 ● Accommodate horizonatal component of oblique subduction; cut and may localize arc intrusions and volcanic; located about 100 km inboard of trench ● Present examples: Semanko fault (Burma), Atacama fault (Chile), Median Tectonic line (Japan)	轉渡斷層(Transfer faults): B_3 ● Transfer horizontal slip from one segment of a major strike-slip fault to its overstepping or en echelon neighbor ● Present examples: Lower Hope Valley and Upper Hurunui Valley faults between the Hope and Kakapo faults (New Zealand), Southern and Northern Diagonal faults (eastern Sinai)
	大陸地殼內的轉形斷層 (Intracontinental transform fault): B_4 ● Separate allochthons of different tectonic styles ● Present example: Garlock fault (California)

引自Sylvester,A.G.(GSAB 1988)

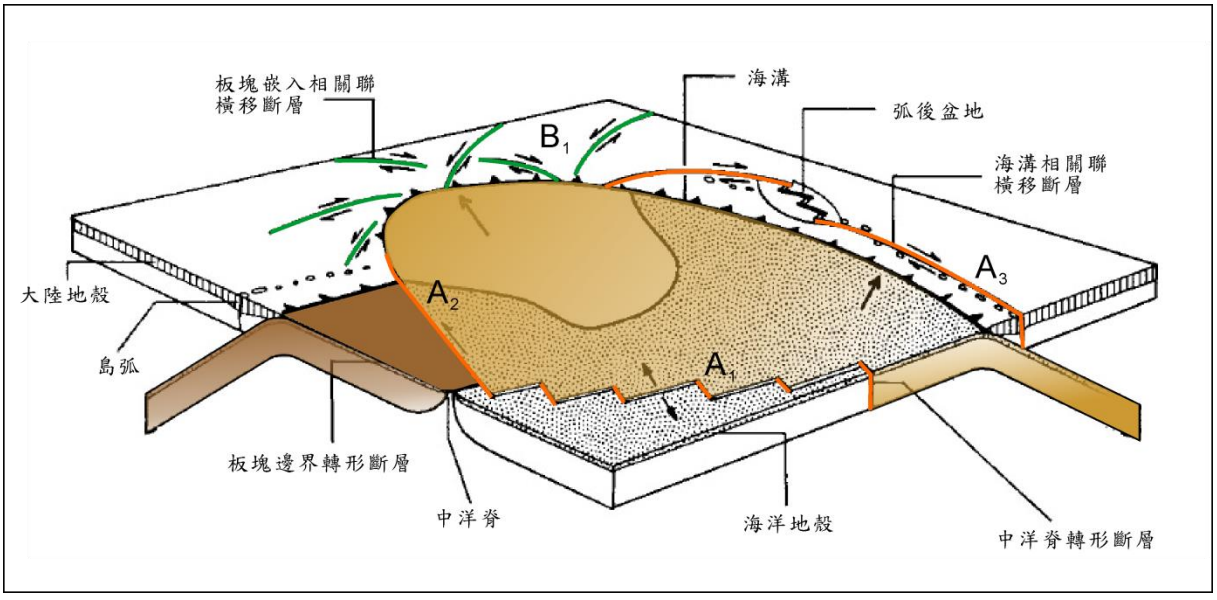


圖 2.1.1 各類橫移斷層在大地構造上與板塊的相互關係(Sylvester, 1988)

表 2.1.2 世界聞名的重大橫移斷層

斷層名稱	分佈位置	地表跡長度（公里）	大地構造	滑移性質	備註
San Andreas fault (A_2)	北美洲西岸	~1300	板塊邊界轉形斷層	右移	最近一次大地震1906年
Denali fault (B_1)	北美阿拉斯加及加拿大	>1500	板塊嵌入相關聯橫移斷層	右移	最近一次大地震2002年
Great Summatra fault(A_3)	印尼屬地的蘇門答臘島	~1900	海溝相關聯橫移斷層	右移	最近一次大地震1921年
Altyn Tagh fault (B_1)	西藏高原北緣	>1200	板塊嵌入相關聯橫移斷層	左移	無歷史地震，槽溝古地震研究發生過去兩三千年曾以兩至三次的大地震
Dead Sea fault (A_2)	中東西奈半島	>1000	板塊邊界轉形斷層	左移	最近一次大地震1995年
North Anatolian fault (B_1)	土耳其	>1000	板塊嵌入相關聯橫移斷層	右移	地震發生於1939, 1942, 1943, 1944, 1957, 1961, 1999(兩次)，由東往西漸進。
Alpine fault (A_2)	紐西蘭南島	>500	板塊邊界轉形斷層	逆右移	1848, 1888, 1929(兩次), 1968, 2003, 2009發生7級以上的歷史地震
Atacama fault (A_3)	智利	>1100	海溝相關聯橫移斷層	左移	?
Philippine fault (A_4)	菲律賓	>1000	?海溝相關聯橫移斷層	左移	最近一次大地震1990年

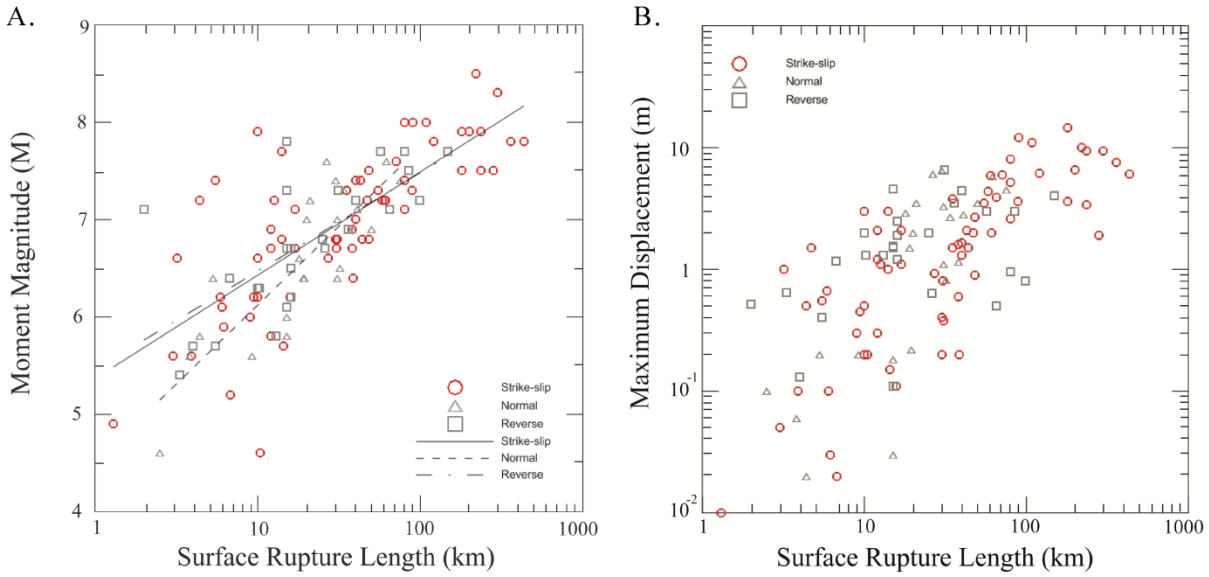


圖 2.1.2 歷史地震斷層彙整資料(A.歷史地震斷層地表破裂長度與最大位移量 B.歷史地震斷層地表破裂長度與地震矩規模)

2.1.2 國內橫移活動斷層

國內的活動橫移斷層中，根據地質調查所的調查報告，單純僅具走向錯移性質的斷層有：右移的屯子腳斷層、梅山斷層、新化斷層及左移的左鎮斷層，以走向錯移為主兼具逆移的有米崙斷層、嶺頂斷層、瑞穗斷層，而以逆移為主兼具走向錯移的有大尖山斷層、潮州斷層、瑞穗斷層及池上斷層，在 33 條的活動斷層中，共有這 11 條具走向錯移性質。目前看來東部的這幾條斷層，包括米崙斷層、嶺頂斷層、瑞穗斷層及池上斷層，其深部可能為相連的斷層帶，亦即分隔菲律賓海板塊和歐亞板塊的縫合構造(suture)，若根據 Sylvester(1988)的分類，這應屬於板塊邊界轉形斷層，而在地表的這些斷層跡，應為這轉形斷層在簡單剪力(simple shear)作用搭配聚合(convergence)的效應下，所形成的類似棕櫚樹的構造(palm tree structure，見圖 1.1.2)。西部的這些斷層根據 Sylvester(1988)的分類，應屬板塊內橫衝斷層，特別是右移的屯子腳斷層、梅山斷層、新化斷層及左移的左鎮斷層，其走向與大地應力的關係，極類似為 Sylvester(1988)提出的純剪力(pure shear)作用下，所可能產生的共軛斷層之其中一支。林啟文等(2007)指出，梅山斷層在近地表處呈現帶狀分布，其位態接近垂直地表，長度接近 13km，垂直位移高達 170~330m，地表下構成的破裂帶寬度可達 450m。另外，新化斷層長度為 6km，其位態也是接近垂直地表，李錫堤(2000)開挖的槽溝中，出現在具有正移分量的橫移斷層常可以看到的花狀構造(圖 2.1.3)。林啟文等(2008)指出，屯子腳斷層長度為 14km，由地球物理探測結果，淺部斷層帶寬約數百公尺，呈現花狀構造。

本年度的國內目標斷層，為米崙斷層，相較於其他的橫移斷層，其地表跡鄰近於人口密度相對較高的花蓮市，以 1951 的花蓮地震為鑑，其屬具相當破壞潛能的危險性地震斷層。我們將在後面的章節中作更進一步的敘述與討論。

2.1.3 橫移斷層砂箱實驗

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

根據前人砂箱試驗結果，在俯視圖最顯著的橫移斷層特徵為：雁型排列(en echelon array)的地表破裂跡、褶皺、正斷層與逆斷層，其中雁型排列的地表破裂跡可稱為雷氏剪裂(Riedel shears)，Naylor *et al*(1986)在砂箱試驗中探討乾砂受橫移斷層錯動的演化(圖 2.1.4)以及 Dooley and Schreurs(2012)整理顯示(圖 2.1.5)，地表變形特徵中雷氏剪裂與褶皺的排列方向，皆可瞭解俯視圖上的地表特徵。

在橫斷層剖面之側視圖中花狀構造為判釋橫移斷層的主要依據，如同 2.1.2 節所述，受到不同應力擠壓，斷層破裂於沉積岩及基盤的界面上開始向地表分岔，而在變形帶內受到斷層錯動所形成的斷塊，呈現狹長的背斜形或向斜形式，Guerroué and Cobbold(2006)彙整地球物理資料中，可以從側視圖明顯看出地層斷塊形成的構造(圖 2.1.6)，其中背斜形式稱為正花狀構造(positive flower structure)如圖 2.1.5(a.b)，向斜形式稱為負花狀構造(negative flower structure) 如圖 2.1.6(c)、圖 2.1.6(d)，

透過俯視及側視圖即可更加了解橫移斷層錯動時破裂跡在三度空間的變化，林慶偉(1994)彙整前人之砂盒物理模型顯示，花狀構造之成因主要是因為雷氏剪裂在三度空間上具有螺旋狀之幾何型貌(圖 2.1.7)，當該破裂在地表呈現雁型排列時，側視圖即可見花狀構造，此外根據 Christie-Blick and Biddle(1985)，橫移斷層錯動導致覆土層的變化，在側視圖上有以下特性：

1. 就單一之剖面而言，不同的分叉斷層可能具有正斷層或逆斷層的離距(normal or reverse separation)。
2. 對同一分叉斷層在不同深度，有時具有正斷層或逆斷層的運動分量。
3. 對同一斷層而言，斷層的傾斜方向在不同的剖面上可能改變，且深度改變其運動方向與距離也不盡相同(圖 2.1.8)。

因此本計畫之橫移斷層砂箱試驗，將透過俯視圖及橫斷層剖面之側視圖觀察，並進行滑移方向、滑移量等參數變化，以探討斷層上覆土層變形行為。

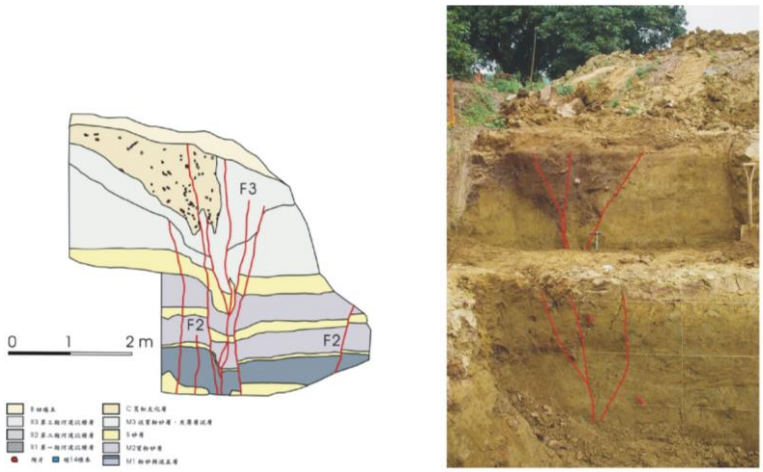


圖 2.1.3 新化斷層槽溝開挖剖面(林啟文等，2007)

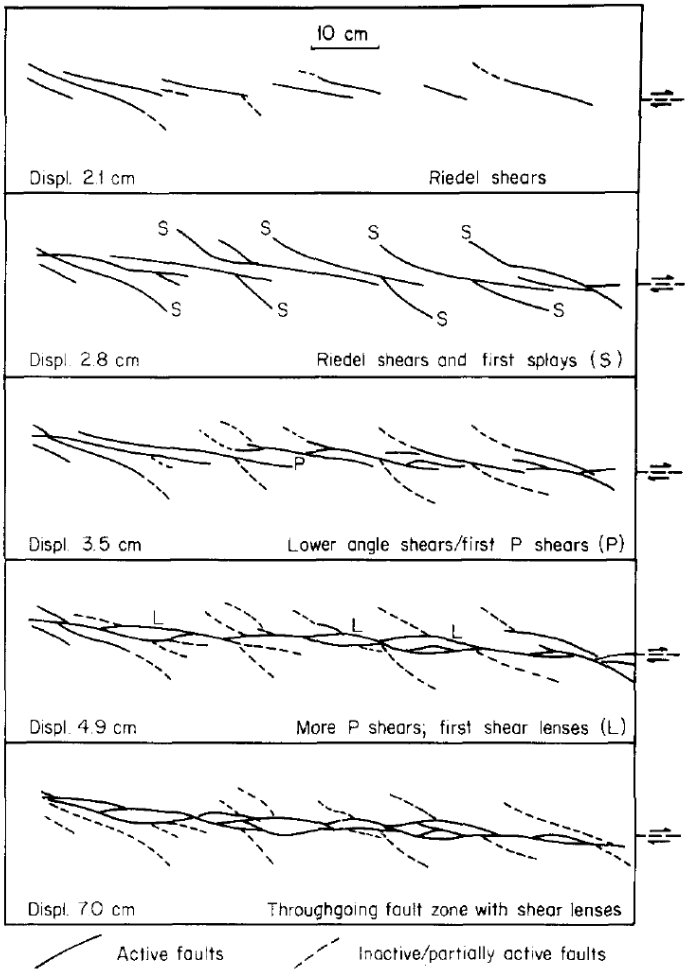


圖 2.1.4 *砂箱試驗中乾砂受橫移斷層錯動的演化*(Naylor *et al*, 1986)

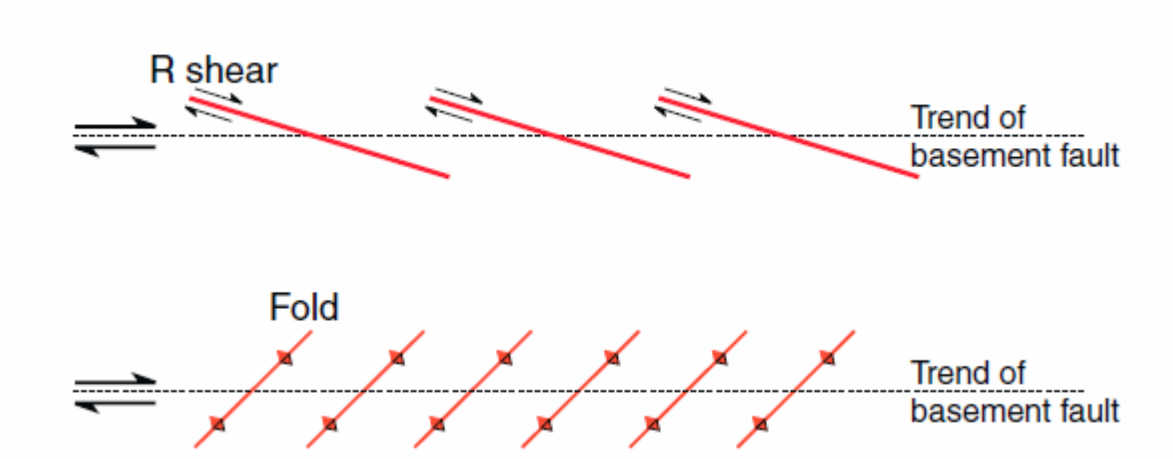


圖 2.1.5 俯視圖可觀察的地表變形特徵(Dooley and Schreurs, 2012)

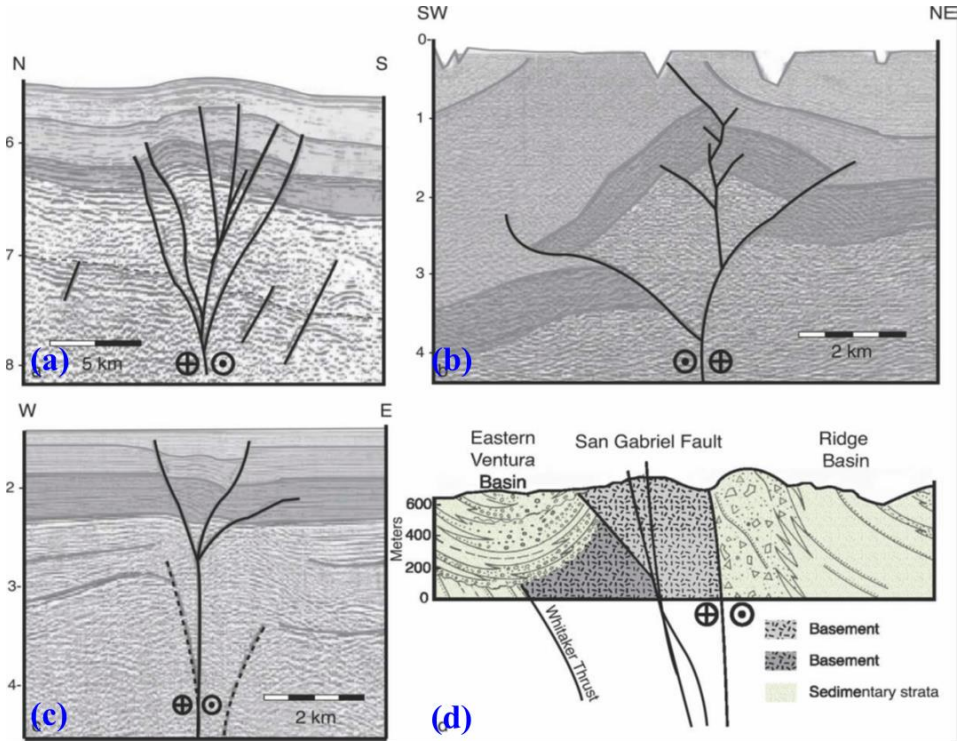


圖 2.1.6 俯視圖可觀察的地層變形特徵(Guerroué and Cobbold, 2006)

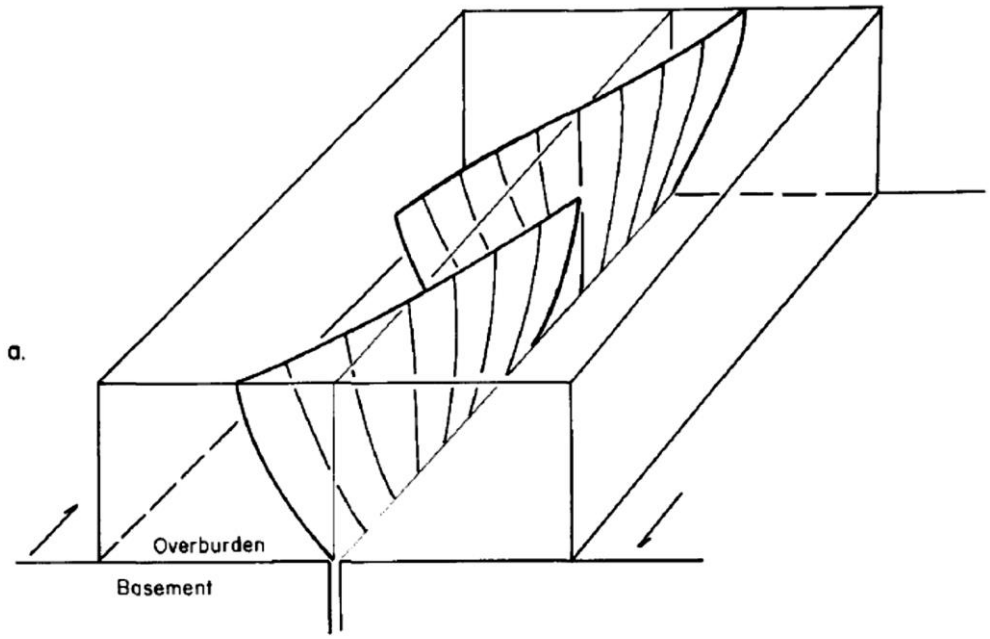


圖 2.1.7 雷氏剪裂在三度空間上具有螺旋狀之幾何型貌(Naylor et al., 1986)

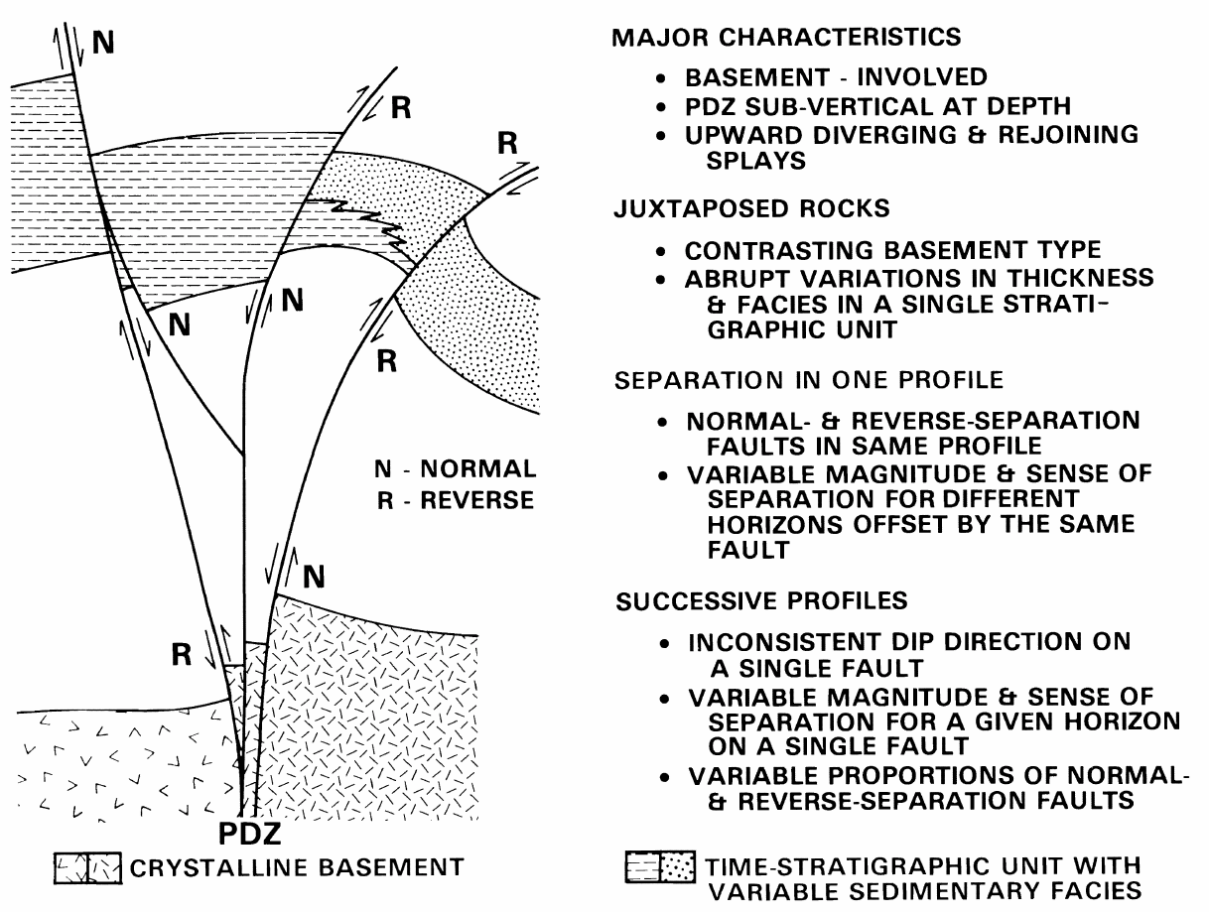


圖 2.1.8 橫移斷層系統在橫剖面下的特徵(Christie-Blick, N., K. T. Biddle, 1985)

2.1.4 橫移斷層數值模擬

過去在斷層數值模擬方法，多採用連續體分析法，其網格無法分離，相較於連續體分析法，非連續體分析法可更加真實的模擬斷層作用下，材料破裂分離等現象，利用顆粒模擬大地材料，並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，為了探討橫移斷層在不同土層深度的變化，本研究嘗試採用 PFC 3D 為分析工具。

而二維分析討論，Place and Mora(2000)曾利用分離元素法探討斷層剪動時，顆粒破碎與擾動情形，並可以看出雷氏剪裂(圖 2.1.9 及圖 2.1.10)，以及 Morgan(2004)透過模擬不同大地材料受斷層作用剪動時材料的變形特性，顯示相同的滑移距離對不同材料其變形行為不同(圖 2.1.11)，皆可說明在斷層作用模擬採用分離元素法，可以良好表現錯動時材料分離的特性，因此本研究也將採用分離元素法進行橫移斷層模擬，並嘗試使用三維分析軟體藉以討論三度空間中材料的位移與變形特性。

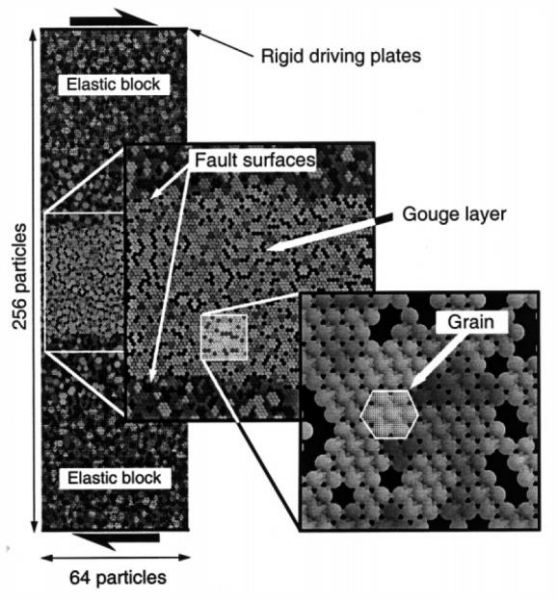


圖 2.1.9 分離元素法探討斷層剪動(Place and Mora, 2000)

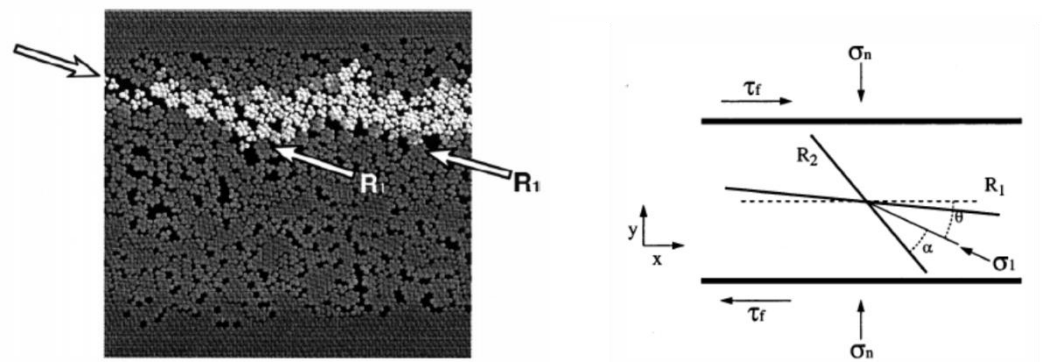


圖 2.1.10 分離元素法探討斷層剪動雷氏剪裂面(Place and Mora, 2000)

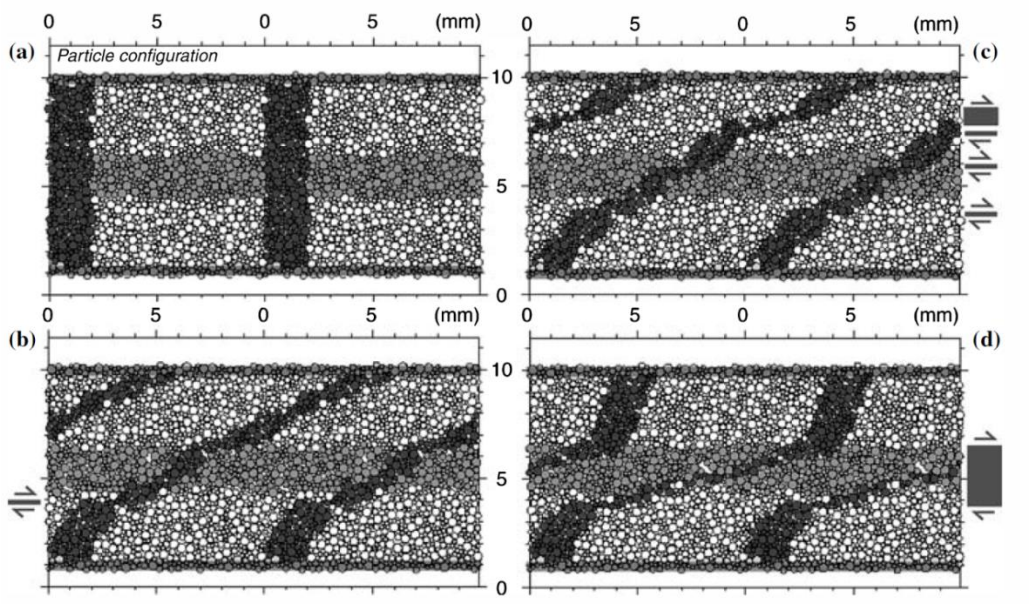


圖 2.1.11 相同的滑移距離對不同材料其變形行為不同(Morgan, 2004)

2.1.5 橫移斷層與結構物互制行為

當斷層作用引致上覆土層變形，當建築物基礎位於此變形帶附近會有明顯之互制現象。當基礎強度較基礎下方土壤高時，其周圍土壤會與基礎分離，但建築物會保持完整，或僅有剛體位移。如基礎強度較低，則基礎會產生剪切破壞，造成建築物的破壞。針對斷層作用引致上覆土層變形行為對地表建築物影響之研究，將目前國內、外相關之研究，整理如表 2.1.3 所示。

針對斷層錯動引致上覆土層變形行為，對地下隧道影響之研究。將目前國內、外相關之研究，整理如表 2.1.4 所示。

由 Anastasopoulos(2010)以數值分析方式模擬土層與地表結構物之互制行為的研究中，以 h 代表斷層岩盤錯動時抬升的高度，以 s 代表地表結構物的位置(斷層線往地表延伸至地表的出露點與結構物中心點的距離)，H 代表土層厚度，B 代表結構物的寬度，q 代表結構的的荷重，其示意圖如圖 2.1.12。由這個研究的結果可以看到結構物的位置對結構物本身有很大的影響，如圖 1.1.13 所示，s/B 為 0.1 時(結構物位置較靠近下盤)，隨著斷層的抬升，荷重越來越集中在結構物最左及最右兩側的 0.2B 的範圍裡面，如同在左右兩側才有支撐的梁一樣，其力矩為負的，當斷層抬升量到達 h/H 為 10%時，結構物所受到的最大剪力為初始的 4 倍，力矩為初始的 9 倍；s/B 為 0.9 時(斷層位置較靠近上盤)，隨著斷層的抬升，荷重越來越集中在結構物中間 0.2B 的範圍裡面，如同只有中間有支撐的梁一樣，其力矩為正的當斷層抬升量到達 h/H 為 10%時，結構物所受到的最大剪力為初始的 4 倍，力矩為初始的 9 倍。

表 2.1.3 斷層作用引致上覆土層變形行為對建築物影響文獻摘錄(鐘春富，2007)

方法	斷層形式	上覆土層材料	結構形式	土壤與結構互制/土壤/結構行為
現地調查				
Sherard *et al*. (1974)	正/逆斷層	土壤	壩體	-
Lazarte *et al*. (1994)	橫移斷層	土壤	基礎	-
Lettis *et al*. (2000)	橫移斷層	土壤	建築物	
Murbach *et al*. (1999)	橫移斷層	土壤	基礎, 高壓電塔	-
Bray (2001)	正/逆斷層	土壤	建築物、壩體、橋樑	-
Ulusay *et al*. (2001)	橫移斷層	土壤	建築物、橋樑、隧道	-
Kelson *et al*. (2001)	逆斷層	土壤	橋樑	-
Kung *et al*. (2001)	逆斷層	土壤	壩體	-
Dong *et al*. (2003)	逆斷層	土壤	建築物	-
Donmez and Pujol (2005)	橫移斷層	土壤	建築物	-
Konagai (2005)	橫移/正斷層	土壤	基礎	-
Anastasopoulos (2005)	正斷層	土壤	建築物	-
Bray and Kelson (2006)	橫移斷層	土壤	建築物、土堤	-
物理模型實驗				
Bray (1990)	逆斷層	黏土	土堤	-
Lazarte (1996)	橫移斷層	黏土	土堤	-
Nahas*et al*. (2006)	正斷層	砂土	基礎	-
數值分析				
Duncan and Lefebvre (1973)	橫移斷層	固定外力	核電廠	無/彈塑性/彈性
Bray (1990)	正/逆斷層	黏土	土堤	有/彈性/彈塑性
Lazarte (1996)	橫移斷層	黏土	土堤	有/彈塑性/彈塑性
Kawashima (2002)	逆斷層	梁-彈簧	橋樑基礎	有/彈性/彈塑性
Anastasopoulos (2005)	正斷層	土壤	建築物	有/彈性/彈塑性
Yilmaz and Paolucci (2007)	正/逆斷層	不排水土壤	基礎	有/彈塑性/彈性
I. Anastasopoulos (2010)	逆斷層	土壤	基礎	有/彈塑性/彈性

表 2.1.4 斷層作用引致上覆土層變形行為對地下結構物影響文獻摘錄(鐘春富，2007)

方法	斷層形式	上覆土層材料	結構形式	變形形式	土壤與結構互制/土壤/結構行為
現地調查					
Bonilla. (1982)	正/逆斷層	土壤	維生管線	-	-
Prentice and Ponti (1997)	正/逆斷層	土壤	隧道	縱向	-
Ulusay *et al*. (2001)	橫移斷層	土壤	隧道	縱向	-
Takada *et al*. (2001)	逆斷層	土壤	維生管線	橫向斷面及縱向	-
Cluff *et al*. (2003)	橫移斷層	土壤	維生管線	縱向	-
Sorensenand Meyer(2003)	橫移斷層	土壤	維生管線	縱向	-
Kontogianni and Stiros (2003)	橫移/逆斷層	土壤	隧道	縱向	-
Honegger *et al*. (2004)	橫移斷層	土壤	維生管線	縱向	-
Konagai (2005)	橫移/正斷層	土壤	隧道、基礎	橫向斷面	-
物理模型實驗					
Burridge *et al*. (1989)	逆斷層	砂土	隧道	縱向	-
Trautmann and O'Rourke (1985)	橫移斷層	砂土	基礎	-	-
Trautmann *et al*. (1985)	橫移斷層	砂土	壩體	-	-
數值分析					
Newmark and Hall (1976)	橫移斷層	梁-彈簧	維生管線	縱向	有/彈性/彈塑性
Kennedy *et al*. (1977)	橫移斷層	梁-彈簧	維生管線	縱向	有/彈性/彈塑性
Wang and Yeh (1985)	橫移斷層	梁-彈簧	維生管線	縱向	有/彈性/彈塑性
Takada *et al.* (2001)	逆斷層	梁-彈簧	維生管線	橫向斷面及縱向	有/彈性/彈塑性
Kawashima (2002)	逆斷層	梁-彈簧	橋樑基礎	縱向	有/彈性/彈塑性
Karamitros *et al*. (2007)	橫移斷層	梁-彈簧	維生管線	縱向	有/彈塑性/彈性
Burridge *et al*., (1989)	逆斷層	砂土	隧道	縱向	-

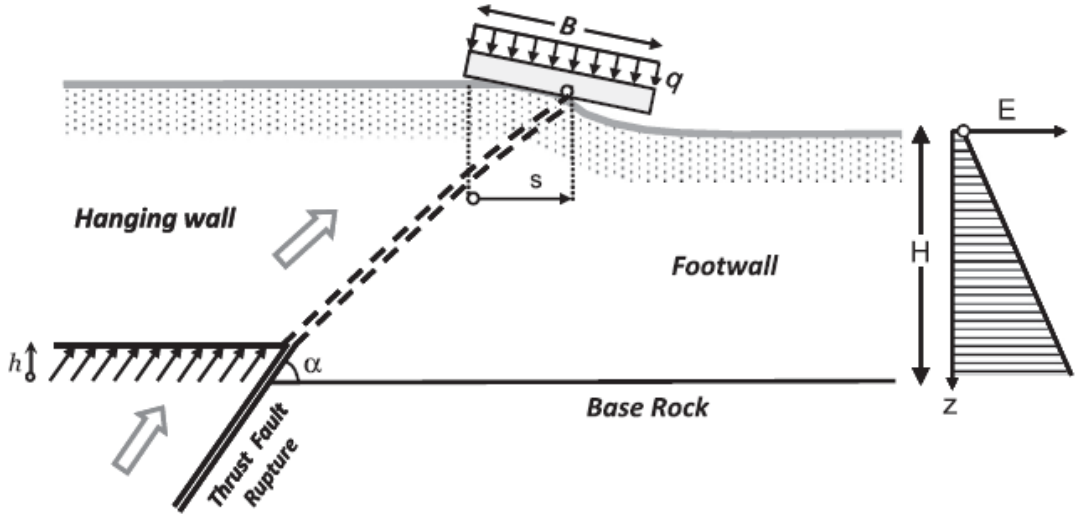


圖 2.1.12 斷層錯動引致上覆土層與結構物互制之數值模擬示意圖

(Anastasopoulos, 2010)

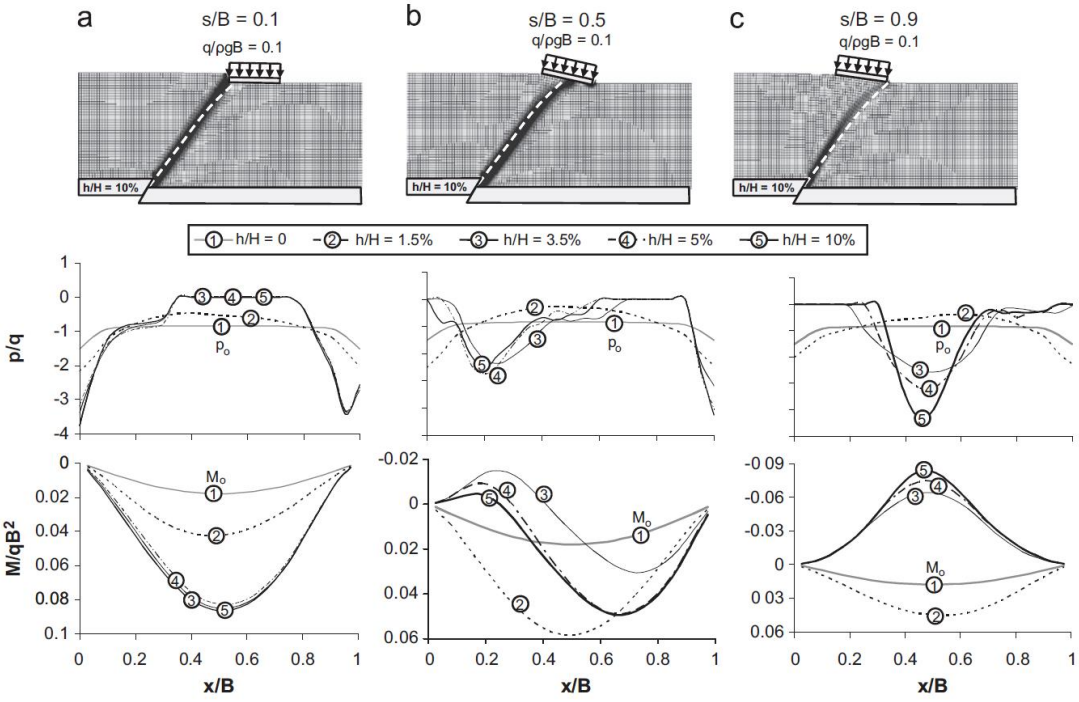


圖 2.1.13 結構物之受力分佈情形受其與斷層之相對位置之影響(Anastasopoulos, 2010)

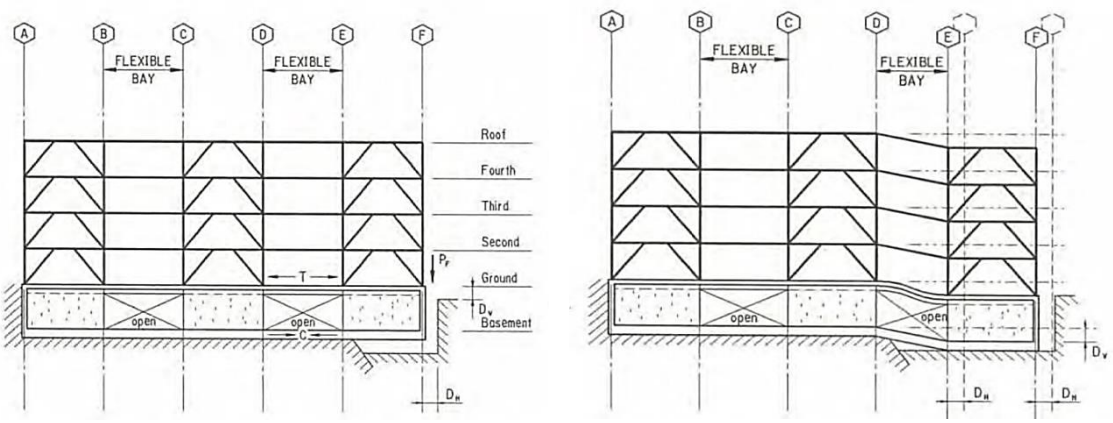
2.1.6 斷層沿線結構物補強或減災方式

斷層線附近建築物之工程應對觀念，隨著時間之演進也逐漸有其變化之處，其不同點主要可以用 1972 年 AP Act 以及 Bray(2012)年所提出觀念看出。以往對於位在活動斷層附近且可能會發生嚴重傷亡或損失之建築物而言，其應對方式便是避免在斷層附近進行相關之工程開發；但若預期之建築物可能不會有過多之居住人口或活動，則斷層附近或許可容許有限度之開發；若活動斷層附近開發之結構物屬於無人居住之設施，則可能可以允許斷層附近之工程活動，對於 AP act 提倡的觀念而言，主要是避開活動斷層附近之工程行為為強調之處；然而就 Bray(2012)所提出之觀念而言，因為可供居住或人類活動之區域面積愈來愈小，特別是對於都市地區而言，若有部分地區有活動斷層經過，則通常無可避免地需要使用到以往 AP act 所建議避開之區域。由於諸如地滑、差異沉陷等地表或地層變形等問題，均可以用工程方式解決，如表 2.1.5 所示，內政部營建署基礎構造設計規範對於建築物可容許之角變量，提出各種狀況下之容許值，而 Bray(2012)亦對於建築物可能破壞狀況提出可容許之角變量或差異沉陷，如液化引致之建築物沉陷量可容許值約為 4 英吋(10 公分)，而同一情形下之可容許水平位移量為 12 英吋(30 公分)。建築物產生差異沉陷之原因眾多，因斷層活動而產生之沉陷僅為其中一種，若其產生之沉陷能夠符合建築物可以容許之沉陷量或差異沉陷，則或許可以參照相關之工程處置方式進行處理及應對，而不是消極地避開活動斷層之附近區域。

表 2.1.5 建築物可容許角變量與破壞程度(內政部營建署基礎構造設計規範)

角變量	建 築 物 損 壞 程 度
1/600	斜撐之構架有受損之危險
1/500	建築物不容許裂縫產生的安全限度（含安全係數）
1/300	隔間牆開始發生裂縫（不含安全係數）
1/250	剛性之高層建築物開始有明顯的傾斜
1/150	隔間牆及磚牆產生相當多的裂縫
1/150	可撓性磚牆之安全限度（含安全係數）
1/150	建築物產生結構性損壞

就工程處置方法而言，若可預期活動斷層所造成之變形量、差異沉陷或是角變量及其可能之發生位置等，則可以利用工程方式進行較有彈性之應對方式，如圖 2.1.14 所示，若相關之建築物臨近已知之活動斷層，則若斷層活動引致之變形量或其發生位置屬於可處理之狀況，則可以以交錯彈性變形區做為建築物之主要結構設計，當變形區位於非彈性變形區時，其懸臂端需能自立，以免結構體產生損壞，而當變形區位於結構彈性變形區時，則建築物可調整本身之變形，使得整體建築物不致於產生全面性的損壞，並維持其基本功能。



(a)變形帶位於懸臂區域　　(b)變形帶位於彈性區域

圖 2.1.14 結構及基礎設計與斷層線附近變形特性(Bray et al. 2012)

另外，工程處置方法亦可能由基礎或改變土壤性質出發，就改變現地土壤性質而言，Bray et al.(2012)利用數值分析進行加勁土壤對於斷層錯動之地表或地層變形影響，如圖 2.1.15 所示，當現地土層無進行任何處理時，則給定斷層錯動端位移量時，可以發現其地表變形影響範圍較窄使得差異沉陷量或是角變量超出可容許範圍，且其剪裂帶會延伸到地表面；而當地層內埋入地工格網進行加勁時，可以發現在同樣的錯動垂直距離下，其影響範圍變寬，且其角變量或差異沉陷量在容許範圍內，另外發展出之剪裂帶亦受到地工格網之限制而未能發展到地表面，由於地工格網加勁土壤等同於地盤改良，使得土壤之強度上升，因此，對於限制地表變形帶之影響範圍而言，的確可以發揮其功能。另外，Bray(2012)亦建議從

基礎的型式來探討相對應之工程處置方法，主要建議使用柔性基礎以允許有限度之變形，其次，應避免使用樁基礎，以免地層下之變形使得樁基礎產生破壞，進而使得結構物本身產生基礎承載力不足而破壞的情形。

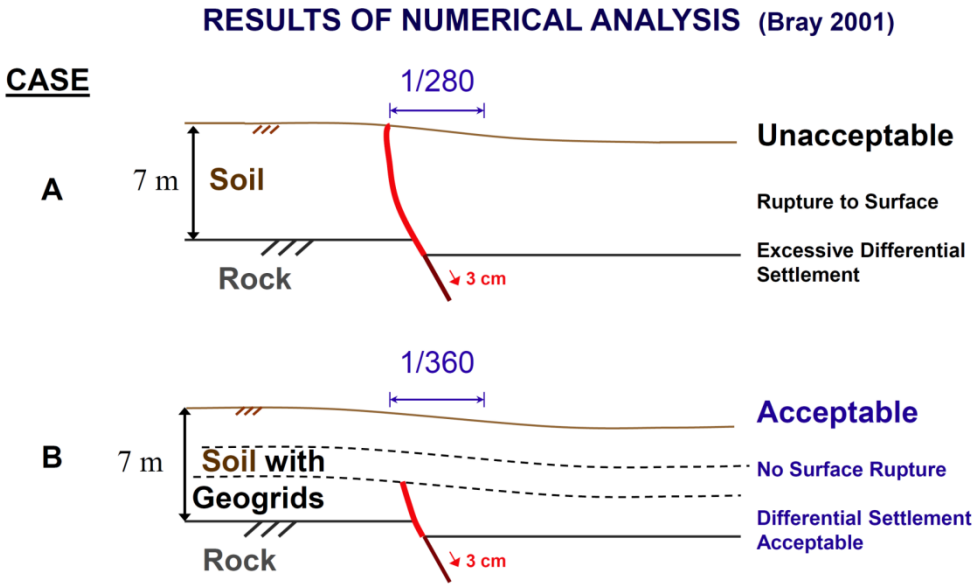


圖 2.1.15 使用地工格網進行道路加勁之工程處置方式

由於斷層線附近之退縮距離概念由完全避開，到使用工程處置方式並在有限變位下，可容許斷層線兩側興建建築物，後續 Oettle and Bray(2013)亦提出地震引致地表破裂時之基礎工程破壞防治對策，由於地表破裂時之角變量以及側向位移常引致結構體產生過大變形，進而可能產生結構倒塌。由基礎工程的角度來看，可採用之策略包括：

1. 將地表變形藉由工程方式傳遞到較大範圍：此一策略主要需要較厚之覆土層，同時其覆土之力學行為偏向韌性破壞(ductile，亦即其應力應變曲線無明顯尖峰值，或其破壞時之應變較大)，若斷層破裂點以上之覆土層屬上述之性質，則其可能在地表之變形影響範圍會較寬，且其對結構之影響會較為輕微(若以樑結構之力矩分佈看來)，如圖 2.1.16 所示；就本研究而言，在地表之破裂帶影響範圍大約為土層厚度之一至二倍。

2. 讓基礎產生剛體位移以避免結構損壞：對於筏式基礎而言，主要功能在於使用基礎版將各柱之載重聯合在一起，並使得柱載動得以藉基礎版傳遞到更廣的範圍，使得承載力破壞不致於發生，此時若使用較厚之鋼筋混凝土基礎版，則由 Oettle 等人之研究亦證明其對於基礎上方之結構物有較高能力之抵抗；當基礎版厚度在 0.2 公尺到 3 公尺之間變化時，可以發現不論是正斷層或逆斷層，當基礎版厚度愈厚時，其分析中之樓地板之力矩大幅下降(且不達到降伏力矩)，且可以在 60 公分之垂直位移狀況下，還不致於產生樓地板之損壞，如圖 2.1.17(a)及(b)所示。

3. 使靠近地表之破裂點轉向並避開結構物：為了使斷層破裂跡於出露地表時避開結構物，可考慮使用相關之大地工程方法，包括基礎下方土壤進行地盤改良(夯實或施加人造材料等)、預計斷層在地表出露點與結構物之間使用連續壁(如圖 2.1.18 所示，研究結果指出此一工法較適用於正斷層)、設置高強度之地下室結構、以地錨之方式將結構物本身之基礎與土壤錨定(但其成效與錨定之長度與強度相關)、斷層於地表之破裂跡與結構物之間做一減震緩衝溝(seismic gap)，另外，Bray 亦指出結構物本身之重量亦能夠將潛在之斷層地表破裂跡引開並遠離結構物。

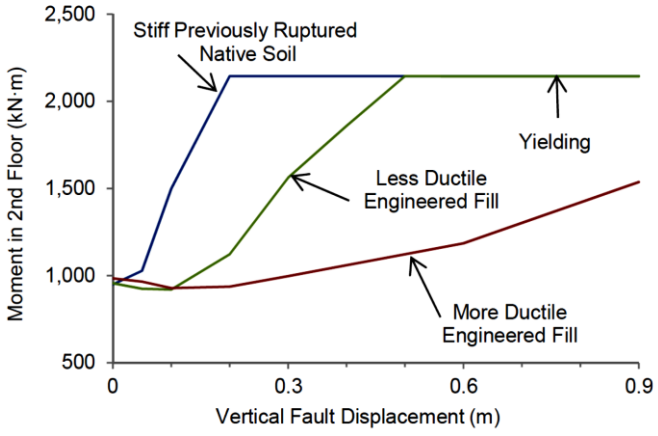
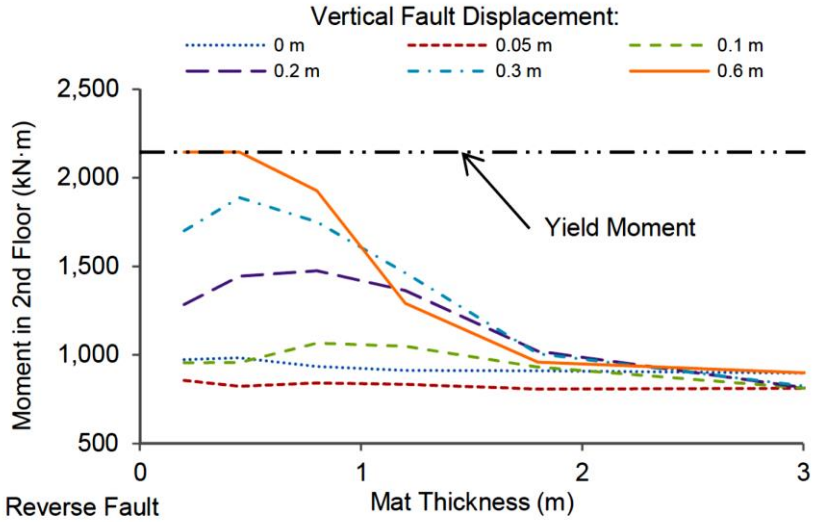
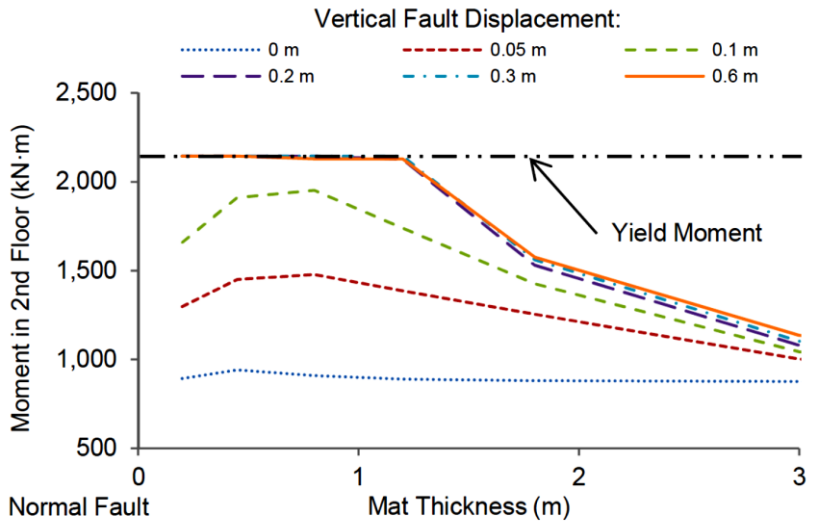


圖 2.1.16 不同韌性覆土層在不同垂直位移下之地版彎矩值分佈圖(Oettle and Bray, 2013)



(a)逆斷層



(b)正斷層

圖 2.1.17 筏式基礎厚度與樓地板彎矩及垂直變位關係圖(Oettle and Bray, 2013)

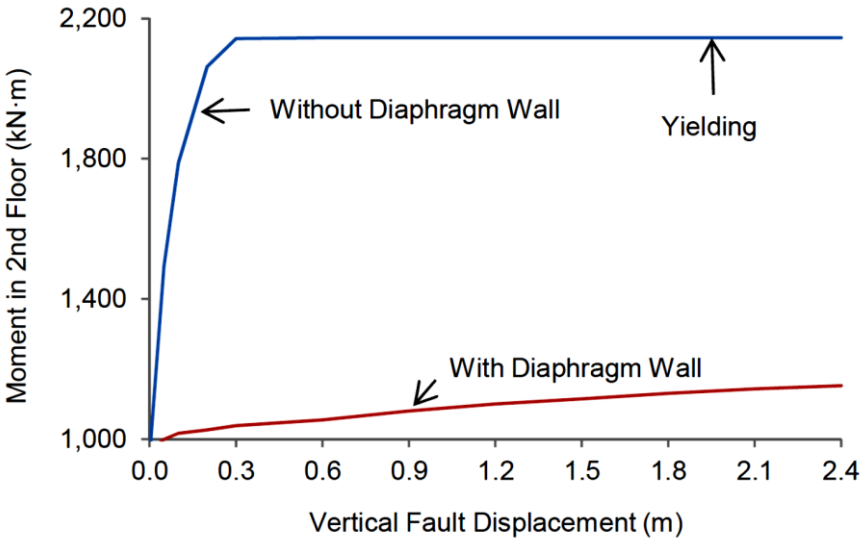


圖 2.1.18 連續壁對樓地板彎矩值及垂直變位之影響關係圖(Oettle and Bray, 2013)

2.2 統計回歸

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可假設為常態分佈或對數常態分佈，如圖 2.2.1 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 2.2.1 可以看出此處標準貫入試驗值分佈約略為一對數常態分佈，本研究先以常態分佈或對數常態分佈做為判斷土壤資料分佈基本函數，有關常態分佈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)

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 2.2.1 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 2.2.1 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)。

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 2.2.2。

由於台灣斷層長度大多為數十公里，因此若需就斷層錯動之影響範圍進行分析時，則可能需要將個別斷層進行分段討論，以探討其各段之地表變形行為，如同上述，沿斷層線兩側之土壤性質空間變異性可藉由自相關函數加以描述，惟分析中需要大量之鑽孔資料以求得較具代表性之分段長度。

若各斷層之分段長度已藉由空間變異性分析求得，或已由臨近斷層之鑽探資料假設，則可考慮對於斷層內各分段長度進行風險評估，表 2.2.2 列出台灣各活動斷層之詳細資料如斷層長度、地震矩規模及迴歸期等(Cheng, et al., 2007)，若需進行風險評估，則可將其中斷層之地震矩規模及迴歸期納入分析，並考慮可能受影響之人數。對於斷層錯動引致臨近人口影響數，本研究考慮地震矩規模對應

之能量與受影響人口數相關，且各斷層之地震矩規模尚可以標準差描述其變異性，因此，考慮各斷層之地震矩規模存在變異性狀況下，假設其為對數常態分佈，便可對於風險評估的模型進行蒙地卡羅分析，以求得不同斷層於不同位置之可能影響人口指數。各斷層地震矩規模乃以地震能量(為地層性質、斷層滑移量及斷層面積之函數)計算而得，由於地震矩規模 5.5 以上所對應之災害屬於較嚴重之災害，因此各斷層之地震矩更可以規模 5.5 對應之地震矩進行正規化，以求得地震矩比值(與規模 5.5 相比)，其地震矩(等同能量，M0)與地震矩規模(Mw)之公式如下：

$$M_0 = 10^{[\frac{3}{2}(M_w+10.7)]} \quad \text{(Eq.2.2.1)}$$

另外，斷層錯動對地表變形可能之影響範圍可由斷層分段長度以及工程影響寬度所圈出之矩形區域定義出，一旦有了上述之影響範圍，便可利用國家之地理資訊系統相關資料找出該影響範圍之居住人口數等，以進行後續風險評估，在此由上述之地震規模(具變異性)、斷層迴歸期、斷層之地震矩比值、影響範圍內之人口數等，可定義出以下式子以進行初步風險評估(以影響人口指數做為評估指標)：

$$\text{影響人口指數} = \frac{(\text{斷層地震矩比值}) \times (\text{影響範圍內人口數}) \times (\text{重要設施係數})}{\text{斷層迴歸期}} \quad \text{(Eq.2.2.2)}$$

其中斷層地震矩比值為一變數，可用斷層之地震矩規模及標準差進行隨機取樣，在此可假設為對數常態分佈。

若以上述之研究方法進行初步分析，則先行選定車籠埔斷層(二處)、山腳斷層以及米崙斷層做為分析之對象，由於臨近斷層鑽孔數量較為不足，因此就空間變異分析而言所得之空間相關長度較不具代表性，因此初步分析中假設斷層分段長度(即為空間上之自相關長度)為 500 公尺，而斷層兩側之影響寬度先假設為 100 公尺及 500 公尺，此斷層兩側之影響寬度與本研究中斷層錯動在地表之影響範圍相關，在此稱為工程影響範圍，各斷層之圈選範圍決定後，對照內政部統計處之人口統計資料，可得到各圈選範圍之基本資料如表 2.2.3 所示。

由表 2.2.3 可以得知，初步分析之四個區域中，以山腳斷層近新北市新莊區之人口數最多，而人口數最少之區域則位於車籠埔斷層在靠近南投縣中寮附近，其餘人口數可見表 2.2.3 所示。初步分析中，考慮各斷層之迴歸期與地震矩規模之變異性後，分別進行5000次蒙地卡羅分析，可得影響人口指數如表 2.2.4 所示。

由於初步分析中之影響人口指數為各種不同性質之參數相乘積，因此其值本身並無任何意義，但若與其他區域相比，則由其值之高低可評估出各斷層在各區域之可能影響人口之相對程度。由影響寬度 100 公尺來看，可以得知車籠埔斷層在靠近台中太平附近之風險較高，相較之下風險最低的區域同樣是位於車籠埔斷層，但位於南投縣中寮地區；但若將斷層之工程影響範圍放大至 500 公尺，則可以得知風險最高之區域位於米崙斷層靠近花蓮市南邊之區域，而車籠埔斷層位於台中太平附近之風險次之，風險最低之區域同樣位於車籠埔斷層靠近南投中寮區域。由上述之初步分析即可得知，若斷層影響範圍不同則其代表之風險程度亦不同。本研究建議在風險評估方面，若能夠定出影響人口指數之標準值，當影響人口指數大於標準值時，代表該範圍之風險太高，需再做某種程度之調整，此時可以將原先之工程影響範圍再變窄，便可使得影響人口指數降至可接受之標準值，其實值意義代表的是，當影響人口指數太高超過標準值，其斷層兩側之工程影響範圍雖已由實驗或模擬所決定，但其影響之人口還是過多，因此需要工程影響範圍做某程度之減少，以使得受影響之人口數下降；同樣的道理，若影響人口指數低於標準值，則代表可能該區域之斷層兩側工程影響範圍可以放寬，使得受影響人口數可以達到標準值。

表 2.2.1 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

表 2.2.2 台灣活動斷層相關資料一覽表(Cheng et al., 2007)

No.	Fault Name	Strike	Dip (degree)	Fault Mechanism	Length (km)	Depth (km)		Ruptuer Width (km)	Displacement (m)	Ruptuer Area (km^2)	Slip Rate (mm/year)	Maximun Magnitude, m_u(M_W)	Recurrence Interval (year)		
						Top	Button						Younngs & Coppersmith, 1985	Matsuda, 1975	Bolina, 1970
01 + 02 + 03	Huangchi + Hsiaoyukeng + Sanchiao	NNE	60SE	Norma & Sinistral	36	0	15	17	1.8	624	2.0±1.0	7.0±0.2	543	746	568
04	Nankan	NNW	80NW	Normal& Dextral	22	0	10	10	0.7	223	0.4±0.2	6.5±0.2	1352	1896	1492
05	Shuanglienpo	ENE	50SE	Reverse	12	2	10	10	0.4	125	0.5±0.25	6.2±0.2	567	1036	831
06	Yangmei	ENE	50NW	Reverse	20	2	10	10	0.8	261	0.5±0.25	6.6±0.2	1082	1704	1334
07	Hukou	ENE	45SE	Thrust	32	0	12	17	1.5	543	1.0±0.5	6.9±0.2	733	1362	1041
08	Hsinchu	E-W	45S	Thrust	28	0	12	17	1.4	475	1.5±0.75	6.8±0.2	395	832	639
09	Tapingti	NNE	45SE	Thrust	15	0	12	17	0.8	255	0.6±0.3	6.5±0.2	653	1378	1080
10	Chutung	NE	50SE	Reverse	14	0	12	16	0.7	219	0.6±0.3	6.5±0.2	760	1249	983
11	Hsincheng	N40E	45SE	Thrust	22	0	12	17	1.1	373	2.0±1.0	6.7±0.2	267	532	412
12	Touhuanping	E-W	80S	Dextral	27	0	12	12	1.0	329	2.5±1.25	6.7±0.2	242	392	304
13	Seztan	N10E	75W	Reverse	35	0	12	12	1.3	435	2.5±1.25	6.8±0.2	259	471	362
14	Shinchoshan	N10E	60E	Reverse	16	0	12	14	0.7	222	2.5±1.25	6.5±0.2	180	302	238
14BT	Miaoli blind thrust	N10E	30E	Reverse & Dextral	37	2	15	26	2.6	962	5.0±2.5	7.2±0.2	223	397	298
15	Tuntzechiao	N60E	90	Dextral	20	0	15	15	0.9	300	2.5±1.25	6.6±0.2	226	368	287
16	Sanyi	NNE	40E	Thrust	22	0	15	23	1.5	513	1.0±0.5	6.9±0.2	940	1313	1005
17	Chelungpu	N-S	40E	Thrust	90	0	20	31	6.8	2800	15.0±7.5	7.7±0.2	182	268	194
18	Changhua	NNS	30E	Thrust	85	2	15	28	5.4	2354	15.0±7.5	7.6±0.2	153	226	165
19	Tamopu-Hsuangtung	N-S	45E	Thrust	70	0	15	21	3.8	1485	0.8±0.4	7.4±0.2	2282	3306	2444
20	Shuilikeng	N-S	50E	Thrust	32	0	15	20	1.8	627	0.6±0.3	7.0±0.2	1810	2495	1898
21	Chenyulanchi	N-S	50E	Thrust	36	0	15	20	2.0	705	0.8±0.4	7.0±0.2	1207	2023	1533
22	Chiuchiungkeng	NNE	35E	Thrust	24	0	15	26	1.8	628	10.0±5.0	7.0±0.2	109	150	114
23	Kukeng	NW	90	Sinistral	10	0	15	15	0.5	161	3.0±1.5	6.3±0.2	136	204	162
24	Meishan	N75E	90	Dextrtal	14	0	15	15	0.7	216	6.0±3.0	6.5±0.2	94	124	98
24BT	Chaiyi blind thrust	N10E	30E	Thrust	36	2	15	26	2.5	936	12.0±6.0	7.2±0.2	122	163	122
25	Chukou	NE	40E	Thrust	70	0	15	25	4.5	1745	10.0±5.0	7.5±0.2	221	298	219
26 + 27	Muchiliao + Liuchia	NNE	35SE	Thrust	30	0	15	26	2.2	785	8.0±4.0	7.1±0.2	155	217	164
28	Tsochen	NW	90	Sinistral	12	0	15	15	0.6	180	2.5±1.25	6.4±0.2	192	263	209
29	Hsinhua	N70E	90	Dextrtal	12	0	15	15	0.6	180	5.0±2.5	6.4±0.2	96	132	104
30	Houchiali	NNE	60W	Thrust	12	0	15	17	0.7	208	5.0±2.5	6.4±0.2	83	145	114
30BT	Tainan blind thrust	N10E	30E	Thrust	36	2	15	26	2.5	936	10.0±5.0	7.2±0.2	146	195	146
31	Hsiaokangshan	NNE	50SE	Reverse	12	0	15	20	0.7	235	1.5±0.75	6.5±0.2	347	523	411
32	Chishan	NE	45E	Thrust	60	0	15	21	3.3	1273	3.0±1.5	7.3±0.2	507	796	592
33	Yuchang	NE	50E	Reverse	12	0	12	16	0.6	195	1.0±0.5	6.4±0.2	437	694	548
34+35	Yenwu + Fenshan	NW	50E	Reverse	21	0	12	16	1.0	329	1.5±0.75	6.7±0.2	487	653	507
36	Liukuei	NE	50E	Reverse	20	0	15	20	1.2	392	0.5±0.25	6.7±0.2	1229	2196	1697
37a	Chaochou(north)	N-S	50E	Reverse	55	0	20	26	3.7	1436	4.0±2.0	7.4±0.2	471	647	479
37b	Chaochou(south)	N-S	50E	Reverse	40	0	20	26	2.8	1044	3.0±1.5	7.2±0.2	433	699	523
38	Hengchun	NNW	50E	Reverse	40	0	20	26	2.8	1044	2.0±1.0	7.2±0.2	650	1048	784
39	Ilan	NE	60SE	Normal	30	0	15	17	1.5	520	1.5±0.75	6.9±0.2	623	882	675
40	Chiaochi	NE	60SE	Normal	25	0	15	17	1.3	433	2.0±1.0	6.8±0.2	397	587	452
41a	Lishan (a)	NNE	60E	Normal	30	0	15	17	1.5	520	1.5±0.75	6.9±0.2	623	882	675
41b	Lishan (b)	NNE	60E	Normal	25	0	15	17	1.3	433	1.2±0.6	6.8±0.2	666	978	753
41c	Lishan (c)	NNE	60E	Normal	30	0	15	17	1.5	520	1.0±0.5	6.9±0.2	940	1323	1013
41d	Lishan (d)	NNE	60E	Normal	30	0	15	17	1.5	520	1.0±0.5	6.9±0.2	940	1323	1013
42	Meilun	N30E	50E	Reverse & Sinistral	30	0	30	39	3.1	1175	20.0±10.0	7.3±0.2	83	113	84
43	Ueimei	N30E	50E	Reverse & Sinistral	45	0	30	39	4.5	1762	20.0±10.0	7.5±0.2	111	148	109
44	Yuli	N30E	50E	Reverse & Sinistral	48	0	30	39	4.7	1880	16.0±8.0	7.5±0.2	130	193	142
45	Chihshang	N25E	50E	Reverse & Sinistral	30	0	30	39	3.1	1175	20.0±10.0	7.3±0.2	83	113	84
46	Yuli West	NNE	50W	Reverse & Sinistral	40	0	25	33	3.4	1305	10.0±5.0	7.3±0.2	150	243	180
47	Luyeh	N-S	50E	Reverse	18	0	25	33	1.7	587	8.0±4.0	6.9±0.2	105	179	137
48	Lichi	N-S	50E	Reverse & Sinistral	24	0	25	33	2.2	783	16.0±8.0	7.1±0.2	78	108	82
49	Chimei	N40E	50E	Reverse & Sinistral	25	0	30	39	2.6	979	4.0±2.0	7.2±0.2	354	502	377
50	Yueikangshan	N70E	80S	Reverse & Sinistral	12	0	10	12	0.5	139	1.0±0.5	6.2±0.2	312	554	443

表 2.2.3 圈選範圍 100 及 500 公尺下之對應統計區及人口數

	圈選範圍：100公尺		圈選範圍：500公尺	
斷層名稱	一級統計區數	人口數	一級統計區數	人口數
車籠埔A(台中太平附近)	8	2694	12	3556
車籠埔B(南投中寮附近)	8	1188	10	1630
米崙(花蓮市南方)	11	3006	29	7751
山腳(新北市新莊附近)	93	26426	170	49078

表 2.2.4 圈選範圍 100 及 500 公尺下之影響人口指數值

	影響人口指數(f(回歸期、地震規模及變異性、圈選範圍))	
斷層名稱	圈選範圍100公尺	圈選範圍500公尺
車籠埔A(台中太平附近)	9916	12806
車籠埔B(南投中寮附近)	4379	6177
米崙(花蓮市南方)	7646	19424
山腳(新北市新莊附近)	5667	10250

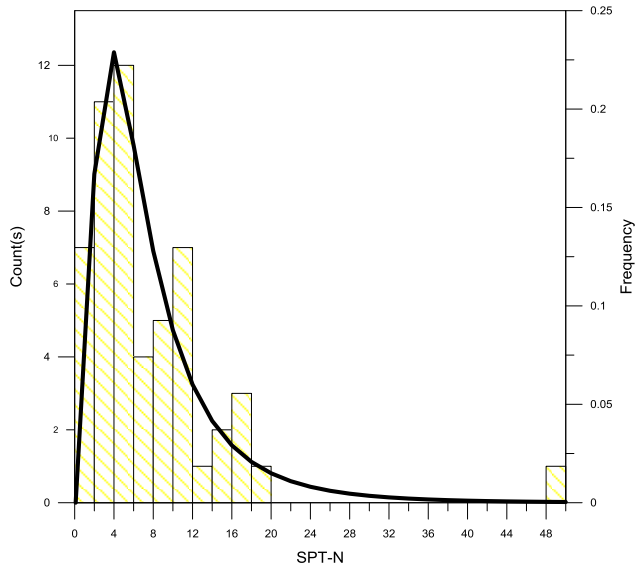


圖 2.2.1 標準貫入試驗值直方圖與分佈頻率圖

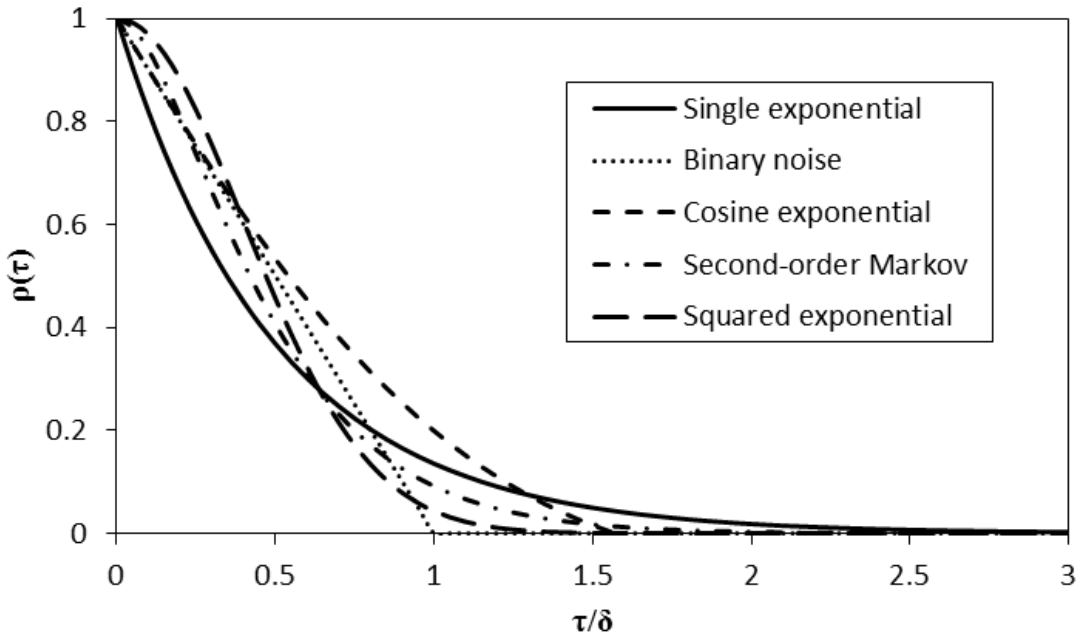


圖 2.2.2 自相關函數類型

2.3 砂箱實驗

2.3.1 離心機介紹

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 2.3.1)。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重要的力學或破壞機制(failure mechanism)，進而提出改進的分析方法。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對該研究問題的可用性(圖 2.3.2)。

表 2.3.1 為離心模型與原型(prototype)相似性的比較。由離心模型試驗原理，經由提高試驗階段的重力加速度至 **Ng**，可達到離心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離心縮尺模型進行試驗時應力相似的條件。因此本研究選用中大地工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，上覆土層中剪切帶的發展和演化現象。

本研究所採用之中大地工離心機(NCU Geotechnical Centrifuge)係由法國的 Acutronic 公司所設計與製造之 665 型，如圖 2.3.3 所示，試驗設備可分為：

1. 離心機機械主體(Centrifuge Mechanical Assembly)。
2. 電源供應系統(Power Supply System)。

3. 操作者使用之桌面控制系統(Operator Desk Controller)。

中大地工離心機的有效旋轉半徑為 3m，荷載容量為 100g-ton，即可將一噸重的試體及設備放置在離心機掛台上運轉至 100g(g 為重力加速度)。新裝置整合單軸向振動台的掛台，其操作最大加速度為 80g，最大載重則為 400kg。

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)，以及掛台使用空間的限制條件。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)不同覆土層厚度；(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)；(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(Y)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 2.3.4(a)為斷層錯動模擬試驗箱，圖 2.3.4(b)則為所裝置地表剖面掃瞄台車的照片。圖 2.3.5(a)及圖 2.3.5(b)為利用地表剖面掃瞄台車掃瞄正斷層及逆斷層錯動試驗，地表剖面的座標系統及試驗配置圖。圖 2.3.6(a)及圖 2.3.6(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。本研究的地表剖面掃瞄台車是一種非接觸量測，且提供密集的地表高程，能夠準確掌握在斷層錯動時，地表剖面的範圍及高程變化。

表 2.3.1 離心模型與原型之相似性比較

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

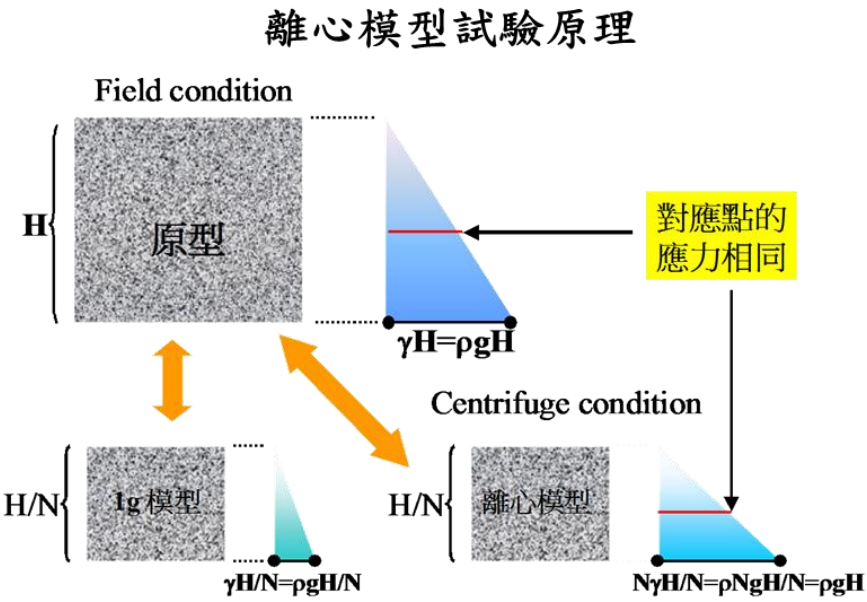


圖 2.3.1 原型、1g 模型與離心模型不同深度處對應點覆土應力之比較

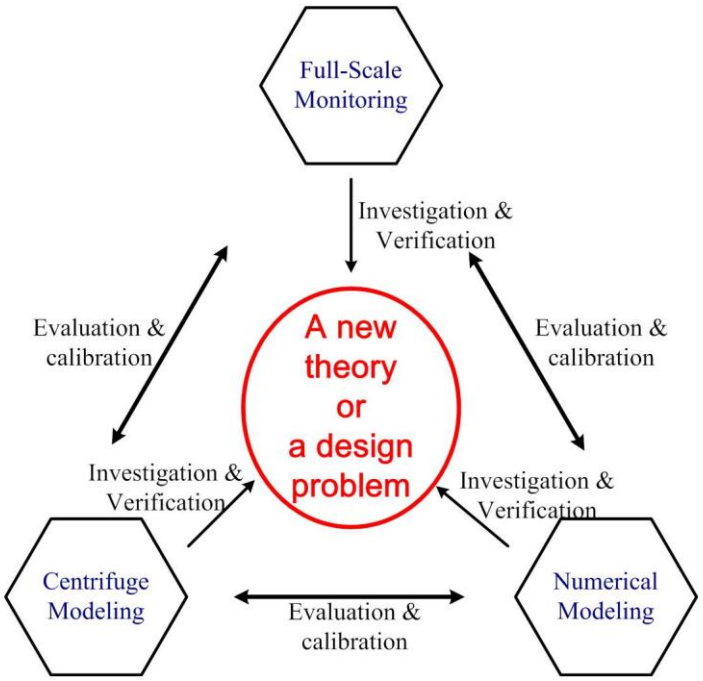
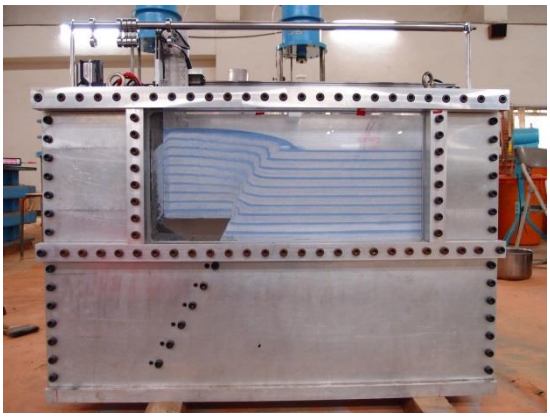
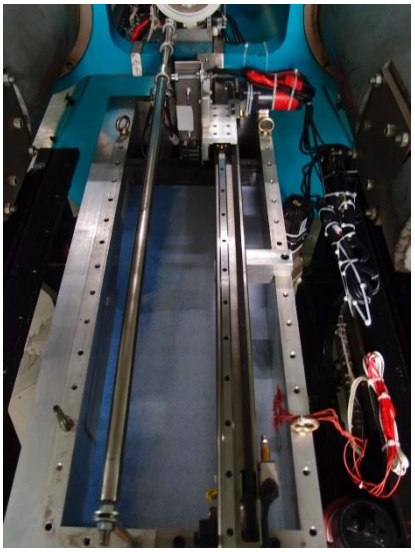


圖 2.3.2 離心模型、數值或分析模型及現場全尺度試驗相互關係



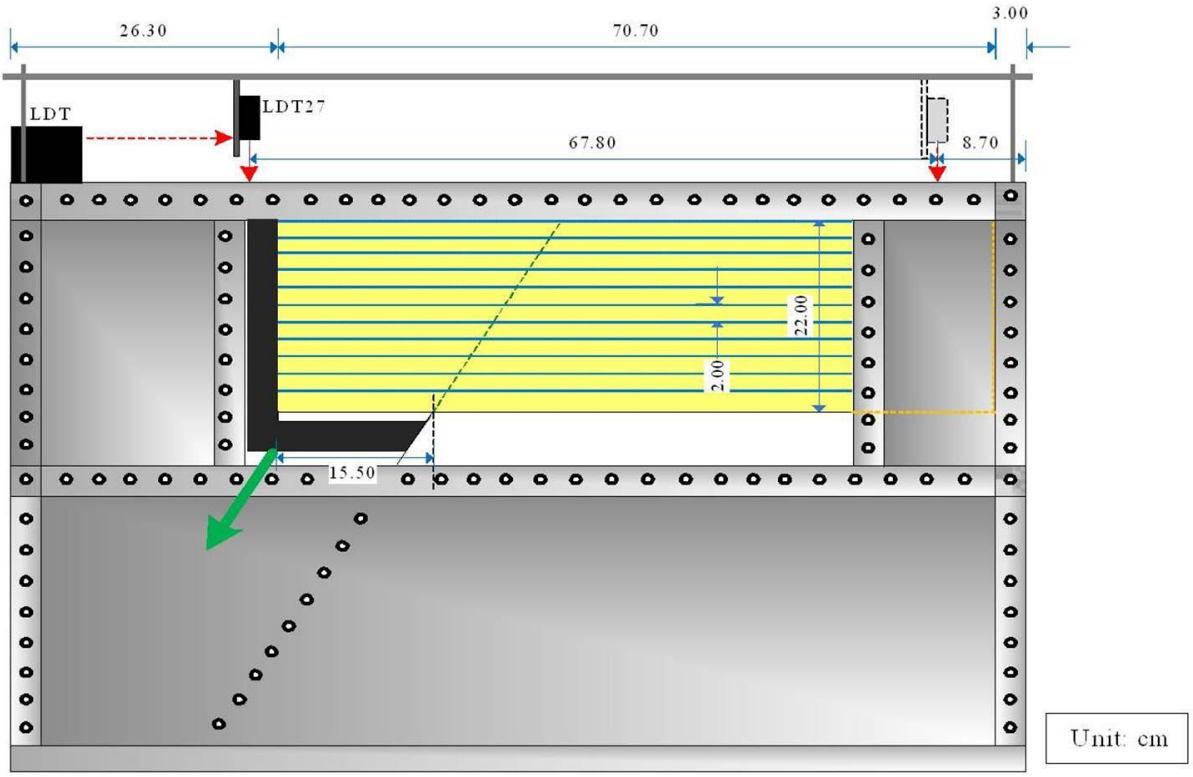
圖 2.3.3 中大地工離心機全景



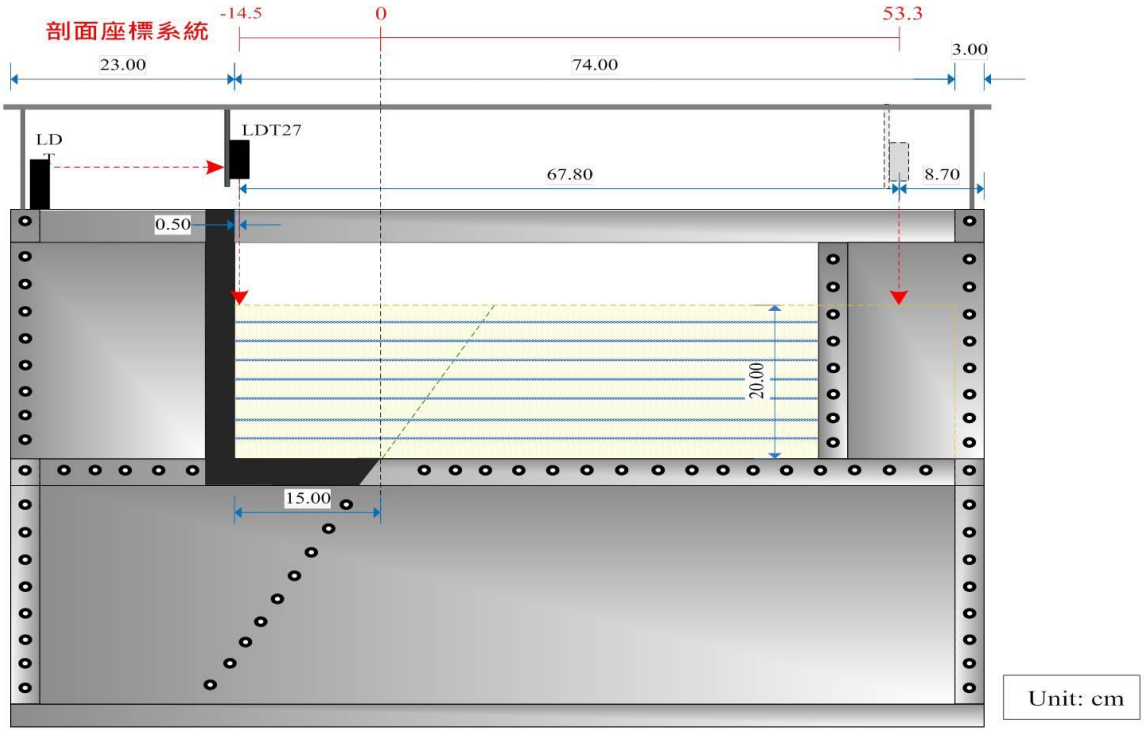


(a) (b)

圖 2.3.4 (a)斷層錯動模擬試驗箱；(b)地表剖面掃瞄台車

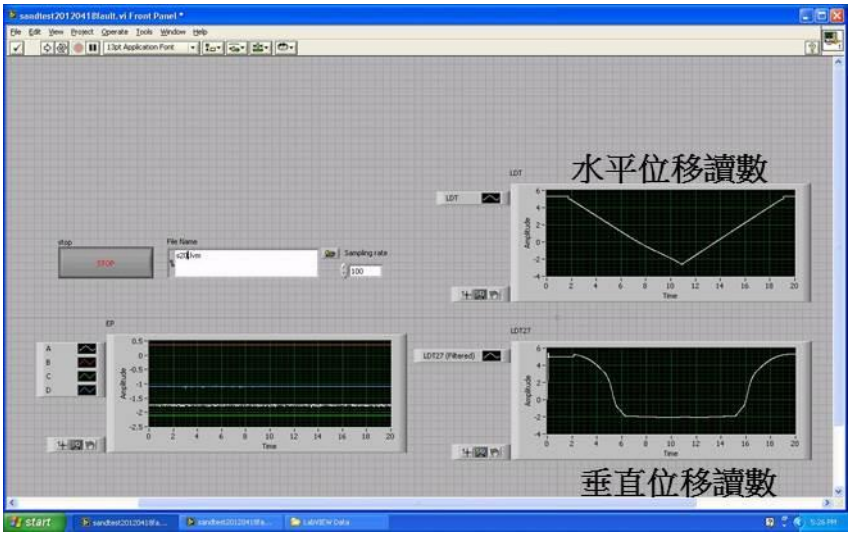


(a)正斷層

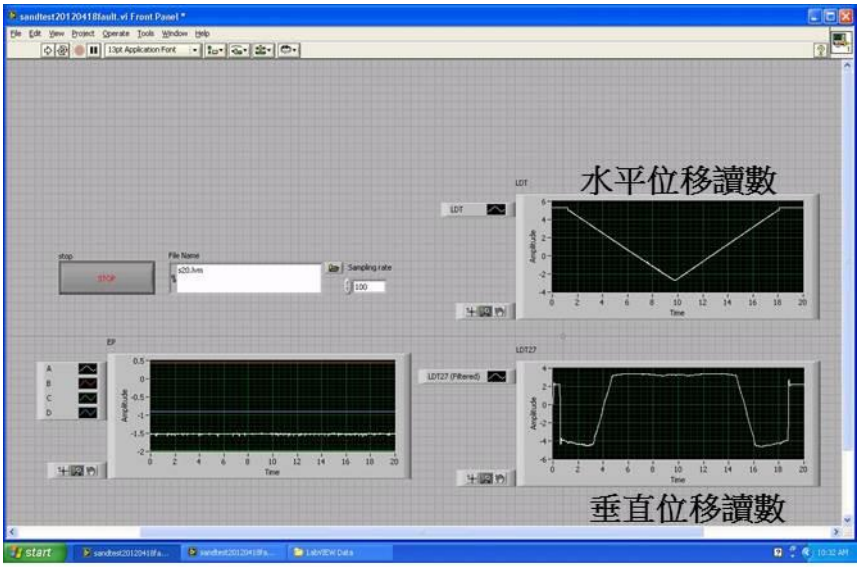


(b)逆斷層

圖 2.3.5 離心機斷層錯動試驗之座標及試驗配置圖



(a)逆斷層



(b)正斷層

圖 2.3.6 掃瞄台車在正逆斷層錯動試驗過程中所量測之地表剖面

2.3.2 離心模型試驗實驗材料性質及試體土層製作

2.3.2.1 試驗用石英矽砂及試體砂土層

本研究離心機模型試驗係利用乾燥石英矽砂來製作砂土試體土層，進行正斷層或逆斷層錯動離心模型試驗。試驗砂土層是由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，依統一土壤分類法屬於 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/m^3)，最小乾單位重為 13.52(kN/m^3)。試體製作之相對密度，由此最大最小乾單位重計算求得。本試驗用砂分別針對相對密度 40%、60%、70% 之乾砂試體進行直接剪力試驗，試驗結果相對密度(Dr)40%乾砂之內摩擦角約為 35。表 2.3.2 為試驗砂樣的基本物理性質；圖 2.3.7 為試驗用砂篩分析曲線。

本研究以實降法製作試體砂土層，以圖 2.3.8 所示之移動式實降儀，配合固定落距，可以製作不同相對密度的試體砂土層。利用移動式實降儀，製作試體砂土層之方法及步驟如下：

1. 降下實降機之盛土漏斗，並將試驗用砂土(石英矽砂)，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。本研究試體土層共設置十層的藍色砂層，幫助掌握地下斷層跡的發展情形。
5. 重複步驟 3、4 直到物理試驗土層，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。

製作完成的試體，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 2.3.6(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 2.3.6(b)所示。每隔固定時間（垂直錯動量約 2.5mm（模型尺寸））為一階段，開動斷層剖面掃瞄台車，進行不同斷層錯動量時的地表剖面量測。最大錯動量約為 50mm(模型尺寸)，因此每階段依序標記為 S1-S20，總共 20 階段的地表剖面量測。試驗完畢後，將斷層錯動模擬試驗箱吊離離心機掛台，由壓克力視窗進行拍照及繪製斷層跡在地層的分佈情況，探討主破裂面及剪切帶的範圍。

2.3.2.2 人工黏土及試體黏土層

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 2.3.9 為本研究人工黏土的夯實曲線及十字片剪力強度的關係。十字片剪力強度隨著含油量的減少而增加。本系列試驗採用兩種不同含油量（40%及 34%）的人工黏土，來製作不同十字片剪力強度的試體黏土層。

本研究利用分層靜壓方式，來準備試體黏土層。人工試體黏土層製作之方法及步驟如下：

1. 首先標記試驗箱的高程，並分層放入拌合完成固定重量之人工黏土。

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，本研究試體床共設置十層的藍色黏土層，幫助掌握地下斷層跡的發展情形。

3. 將黏土層利用靜壓壓到預定的高度，藉以達到所預定之土壤密度。

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 2.3.10 為人工試體黏土層（含油量 40%）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 16.7kN/m3，平均十字片剪力強度 46kPa 左右。另外圖 2.3.11 為人工黏土試體（含油量 34%）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 16.6kN/m3，平均十字片剪力強度較高約 110kPa 左右。

2.3.2.3 砂黏土互層試體

本研究採用人工黏土製作下層 11cm 的人工試體黏土層（含油量 34%，平均十字片剪力強度 110 kPa 左右），然後再利用前面所述的霣降法再次製作上層 11cm 的試體砂土層（Dr≒70%）。

完成製作的黏土試體床或砂黏土互層試體，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。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，進行正斷層或逆斷層錯動的模擬。每隔固定時間(垂直錯動量約 2.5mm(模型尺寸))為一階段，開動斷層剖面掃瞄台車，進行不同斷層錯動量時的地表剖面量測。最大錯動量約為 50mm（模型尺寸），因此每階段依序標記為 S1-S20，總共 20 階段的地表剖面量測。試驗完畢後，將斷層錯動模擬試驗箱吊離離心機掛台，由壓克力視窗進行拍照，並繪製斷層跡在地下土層的分佈情況，探討主破裂面及剪切帶的範圍。

2.3.2.4 截至目前已完成試驗的試驗編號及試驗條件

表 2.3.3 為截至目前，已完成正逆斷層錯動試驗的試驗編號及試驗條件。紅色粗體字顯示者為本年度完成的試驗編號及試驗條件。

表 2.3.2 試驗土樣之基本物理性質

砂樣	石英矽砂
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 2.3.3 自計畫第一年以來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)	3.0 (2.4 m)
1gRtest14	70	20	5.0

表 2.3.3 目前已完成的試驗編號及試驗條件(續)

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-A	**70**	**20 (16 m)**	**1.75 (1.4 m)**
50gNtest36-C	**Clay**	**22 (17.6 m)**	**5.0 (2.5 m)**
80gNtest37-C	**Clay**	**22 (17.6 m)**	**5.0 (4.0 m)**
80gRtest38-C	**Clay**	**22 (17.6 m)**	**5.0 (4.0 m)**
80gRtest39-F-B	**70**	**20 (16 m)**	**5.0 (4.0 m)**
80gRtest41-F-B	**70**	**20 (16 m)**	**5.0 (4.0 m)**
80gRtest43	**70**	**10 (8m)**	**5.0 (4.0m)**
80gNtest44-C-H	**Clay**	**22 (17.6m)**	**5.0 (4.0m)**
80gRtest46-C-H	**Clay**	**22 (17.6m)**	**5.0 (4.0m)**
80gRtest47-F-C	**70**	**20 (16m)**	**5.0 (4.0m)**
80gRtest50	**50**	**20 (16m)**	**5.0 (4.0m)**
80gRtest52-F-B	**70**	**20 (16m)**	**5.0 (4.0m)**

表 2.3.3 目前已完成的試驗編號及試驗條件(續)

40gRtest57-F-D	**70**	**20 (8m)**	**5.0 (2.0m)**
80gNtest58-F-B	**70**	**20 (16m)**	**5.0 (4.0m)**
80gNtest59-S/C	**70-Clay**	**21 (16.2m)**	**5.0 (4.0m)**
70gRtest60-S/C	**70-Clay**	**21 (14.7m)**	**5.0 (3.5m)**
70gRtest61-F-D	**70**	**20 (14 m)**	**5.0 (3.5m)**
70gNtest62-F-B	**70**	**20 (14 m)**	**5.0 (3.5m)**
70gNtest63-F-B	**70**	**20 (14 m)**	**5.0 (3.5m)**
70gNtest64-F-B	**70**	**20 (14 m)**	**5.0 (3.5m)**
70gNtest65-F-C	**70**	**20 (14 m)**	**5.0 (3.5m)**
70gNtest66-F-D	**70**	**20 (14 m)**	**5.0 (3.5m)**
70gNtest67-F-A	**70**	**20 (14 m)**	**5.0 (3.5m)**
1gNtest68	**70**	**20 (0.2 m)**	**5.0 (0.05 m)**
70gNtest69	**70**	**20 (14 m)**	**5.0 (3.5m)**
70gNtest70-F-B	**70**	**20 (14 m)**	**5.0 (3.5m)**
70gNtest71-F-B	**70**	**20 (14 m)**	**5.0 (3.5m)**
70gNtest72-growth(I)	**70**	**18 (12.6 m)**	**2.5 (1.75m)**
70gNtest72-growth(II)	**70**	**20 (14 m)**	**5.0 (1.75m)**

*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。

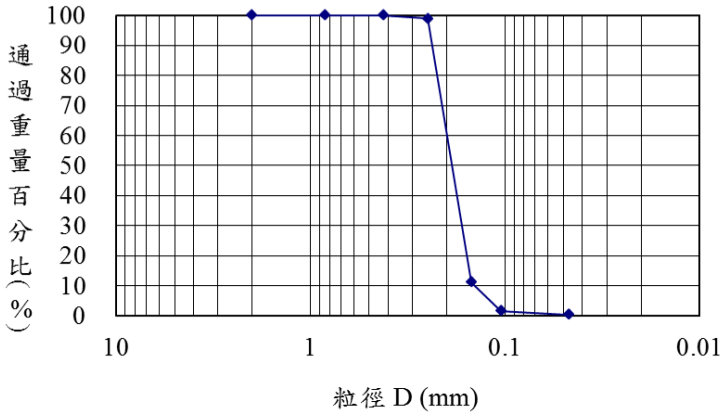


圖 2.3.7 試驗土樣之粒徑分佈圖



圖 2.3.8 裝置於試驗箱上之移動式貫降儀

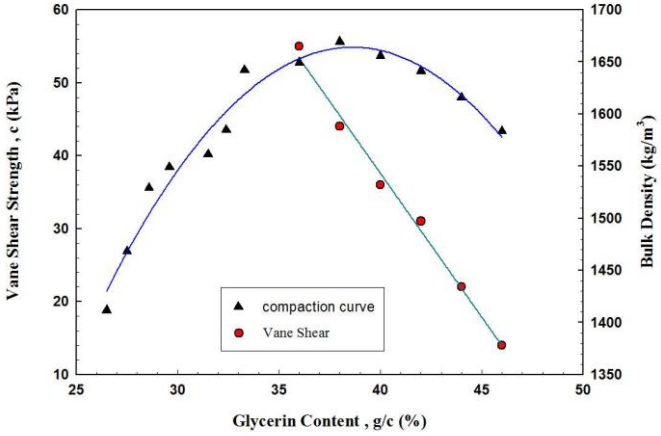


圖 2.3.9 人工黏土的夯實曲線及十字片剪力強度關係

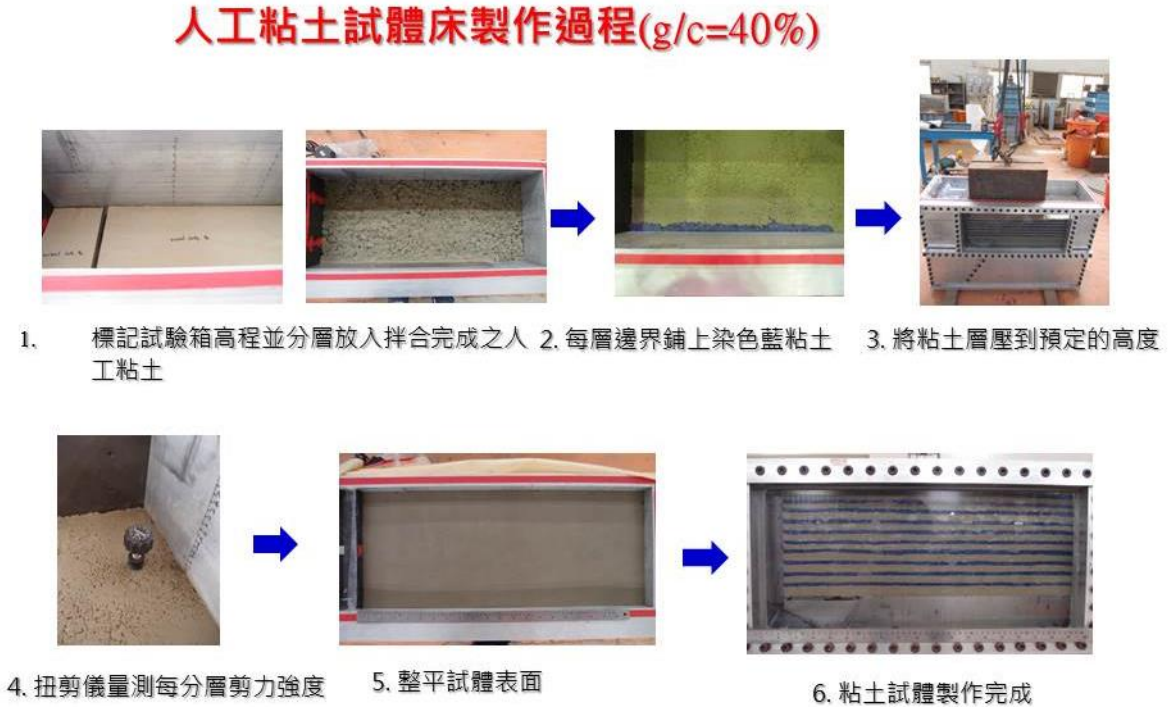


圖 2.3.10 人工試體黏土層(g/c=40%)之準備過程

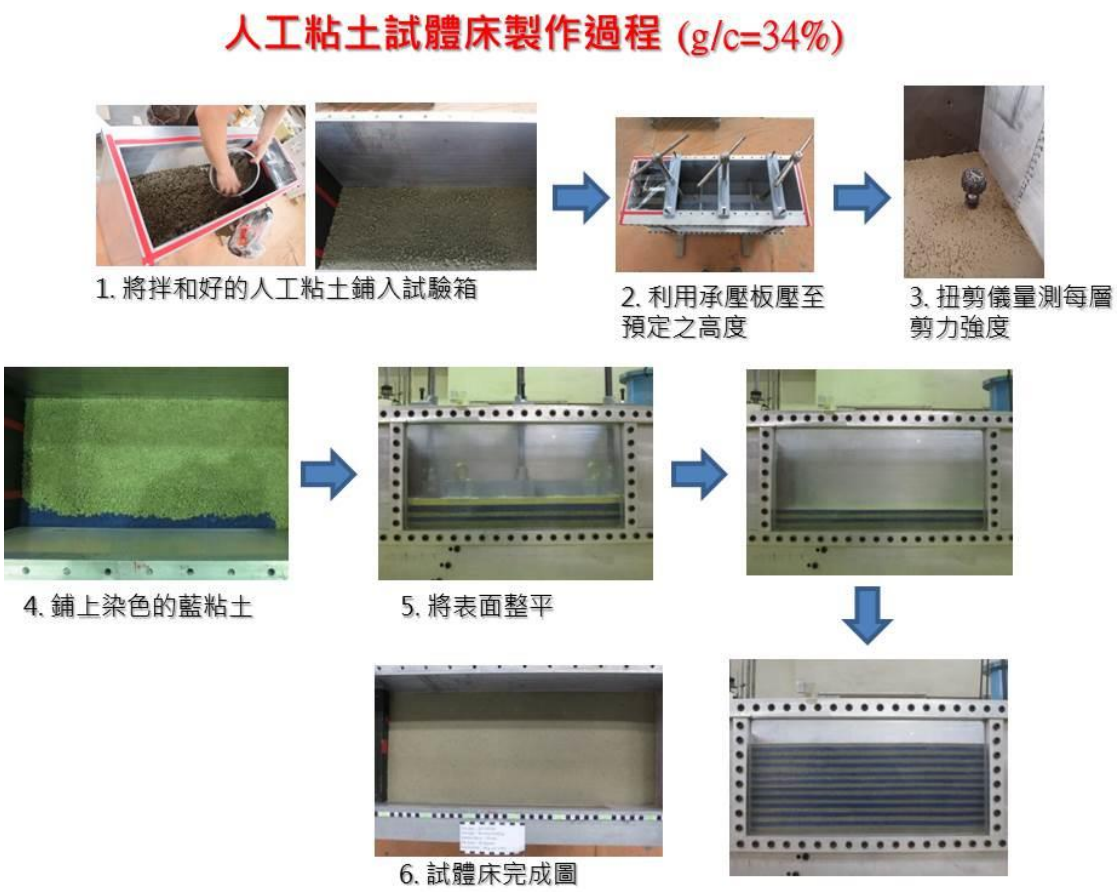


圖 2.3.11 人工試體黏土層(g/c=34%)之準備過程

2.3.3 離心機模型砂箱實驗規畫

表 2.3.3 為兩年來已經完成的試驗編號及試驗條件。今年度主要進行黏土、砂土與黏土互層試體等自由場的正逆斷層錯動試驗。另外也進行座落於相對於斷層跡不同位置的剛性基礎，對斷層破裂跡及地表變形的影響。表 2.3.4 為今年截至目前所完成的斷層錯動試驗。今年度的離心模型試驗著重於剛性基礎與正斷層錯動的互制試驗，觀察剛性基礎版對地表變位剖面及地下破裂跡的影響。

表 2.3.4 今年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)
80gNtest35-F-A	**70**	**20 (16 m)**	**1.75 (1.4 m)**
50gNtest36-C	**Clay**	**22 (17.6 m)**	**5.0 (2.5 m)**
80gNtest37-C	**Clay**	**22 (17.6 m)**	**5.0 (4.0 m)**
80gRtest38-C	**Clay**	**22 (17.6 m)**	**5.0 (4.0 m)**
80gRtest39-F-B	**70**	**20 (16 m)**	**5.0 (4.0 m)**
80gRtest41-F-B	**70**	**20 (16 m)**	**5.0 (4.0 m)**
80gRtest43	**70**	**10 (8m)**	**5.0 (4.0m)**
80gNtest44-C-H	**Clay**	**22 (17.6m)**	**5.0 (4.0m)**
80gRtest46-C-H	**Clay**	**22 (17.6m)**	**5.0 (4.0m)**
80gRtest47-F-C	**70**	**20 (16m)**	**5.0 (4.0m)**
80gRtest50	**50**	**20 (16m)**	**5.0 (4.0m)**
80gRtest52-F-B	**70**	**20 (16m)**	**5.0 (4.0m)**
40gRtest57-F-D	**70**	**20 (8m)**	**5.0 (2.0m)**
80gNtest58-F-B	**70**	**20 (16m)**	**5.0 (4.0m)**
80gNtest59-S/C	**70-Clay**	**21 (16.2m)**	**5.0 (4.0m)**
70gRtest60-S/C	**70-Clay**	**21 (14.7m)**	**5.0 (3.5m)**
70gRtest61-F-D	**70**	**20 (14 m)**	**5.0 (3.5m)**
70gNtest62-F-B	**70**	**20 (14 m)**	**5.0 (3.5m)**
70gNtest63-F-B	**70**	**20 (14 m)**	**5.0 (3.5m)**
70gNtest64-F-B	**70**	**20 (14 m)**	**5.0 (3.5m)**
70gNtest65-F-C	**70**	**20 (14 m)**	**5.0 (3.5m)**
70gNtest66-F-D	**70**	**20 (14 m)**	**5.0 (3.5m)**

70gNtest67-F-A	**70**	**20 (14 m)**	**5.0 (3.5m)**
1gNtest68	**70**	**20 (0.2 m)**	**5.0 (0.05 m)**
70gNtest69	**70**	**20 (14 m)**	**5.0 (3.5m)**
70gNtest70-F-B	**70**	**20 (14 m)**	**5.0 (3.5m)**
70gNtest71-F-B	**70**	**20 (14 m)**	**5.0 (3.5m)**
70gNtest72-growth(I)	**70**		
70gNtest72-growth(II)	**70**		

*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。

2.3.4 橫移斷層砂箱

2.3.4.1 砂箱尺寸

本研究所使用之橫移斷層砂箱尺寸為 33cm(長)×22cm(寬)×10cm(高)，高度則視所鋪設砂層厚度而定，如圖 2.3.12 所示。斷層傾角設定為 90 度，砂箱沿斷層兩側分為動盒及不動盒兩部份，不動盒固定於底座，為不可移動側。動盒由螺桿控制水平移動，由氣墊控制上下移動，平移、抬升及陷落最大可移動距離皆為 3cm。由動盒之相對不動盒左移或右移，分別模擬左移斷層或右移斷層作用行為。由動盒之相對不動盒抬昇或下降，分別模擬逆斷層或正斷層作用行為。為方便觀察土層變位，砂箱盒皆採用 0.5~1cm 厚壓克力板固定。

砂箱試驗過程中分為兩個部分，主要為前置作業及試驗過程。前置作業包含壓克力板塗油、防止漏砂、染色砂準備等。壓克板塗油主要目的在於克服砂子與壓克力板間之界面摩擦力。染色砂準備目的，為觀察試驗進行中上覆土層中斷層面之發展過程及行為。因此實驗時須利用染色之石英砂作為分層，以模擬自然環境中地層之層狀構造。

砂箱試驗配置，如圖 2.3.13(a)所示。鋪砂完成後，由螺桿控制動盒相對運動模擬左移斷層滑移錯動之現象，基盤之側向滑移量為 5cm。同時則將數位攝影機調整後於砂箱上方約 1m 處，以固定焦距方式連續拍攝。紀錄基盤滑移過程中，地表砂土斷層尖端擴展、擴展路徑及最後地表變形之形貌。

並利用雷射掃描測距系統，量測砂層之地表起伏特性與分布，砂箱盒架於雷射掃描儀上，如圖 2.3.13(b)所示，此系統共有三部分，為掃描機台、雷射位移計與資訊紀錄器(圖 2.3.14)，相關規格如下：

1. 掃描機台:為一金屬台架，台上設有供精密量測用之花崗石檯，X 軸及 Y 軸之水平軸以步進馬達驅動滾珠螺桿使 Z 軸之雷射位移計進行平面運動。
2. 光學尺:位移計之水平位置以光學尺定位，以讀數計控制並顯示 X-Y 座標軸之位置座標值，精度為 1μm。

3. 雷射位移計:高程量測採用非接觸式之雷射位移計，以改善傳統機械碳針過於尖銳可能刮傷試體表面的缺點，雷射位移計是日製 KEYENCE 牌 LC-2320 型，光源為紅色半導體雷射，容許掃描試體表面高程範圍±8mm，垂直解析度為 0.5μm。

4. 資料記錄系統:將光學尺與雷射位移計所測之數據透過 RS-232C 介面傳遞至電腦紀錄。

砂箱試驗過程中隨著基盤滑移過程中斷層於地表發展之情形，如圖 2.3.15 所示。由於基盤滑移過程中砂土顆粒本身受到剪動時，會產生顆粒間重新排列或剪動之現象。但實驗中僅將色砂層用於模擬地層分層，因此在地表不易觀察斷層破裂情形，未來將最頂部表層也採用色砂層作為標誌層，由標誌層發生扭曲或剪動之現象，則將此定義斷層面已發展至該色砂層之位置。依此可描繪出斷層面發展之情形及斷層面遷移行為。

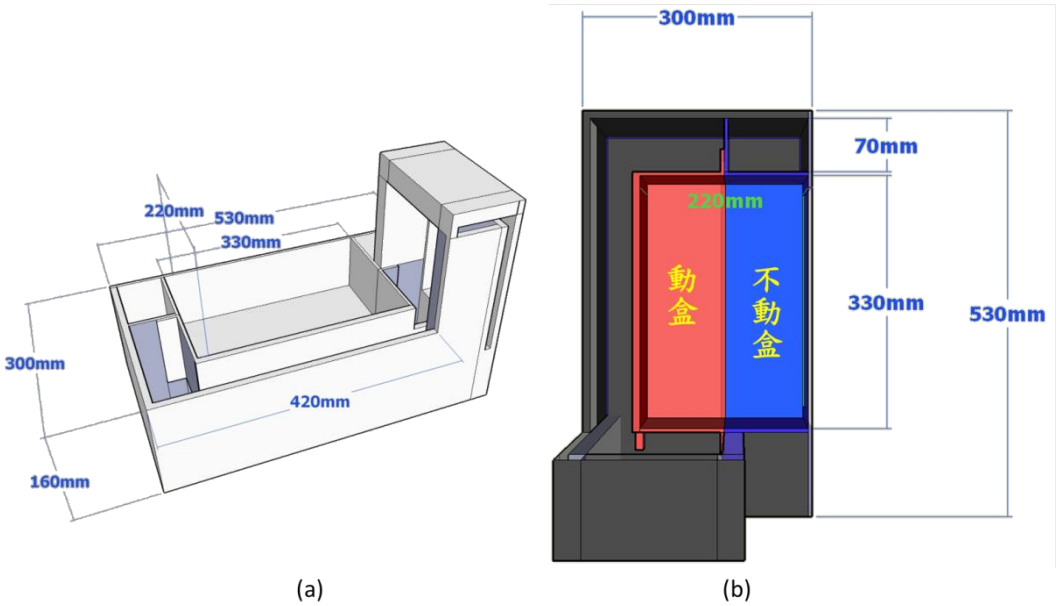


圖 2.3.12 橫移斷層砂試驗模型。(a)側視圖(b)俯視圖

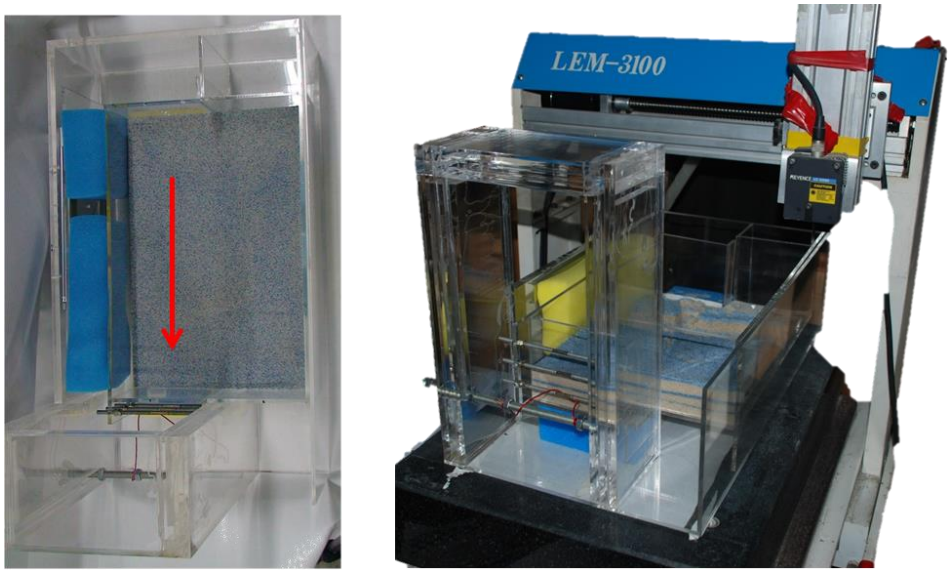


圖 2.3.13 (a)砂箱模型鋪沙狀況及(b)設置於雷射掃描儀



圖 2.3.14 雷射掃描測距系統

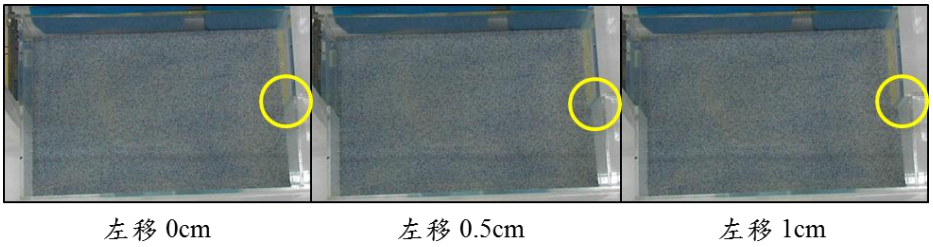


圖 2.3.15 砂箱模擬左移斷層

2.3.4.2 實驗材料性質

參考鍾春富(2007)砂箱實驗中為控制上覆砂土層之材料參數，因此選擇越南石英砂。此砂土之物理性質如表 3.1 所示。砂土之級配為#40~#140 篩之均勻級配，礦物組成 99%以上為石英，其餘包含少量長石、雲母及貝殼。砂土最大粒徑小於 0.84mm，平均細料含量(小於#200 篩)為 0.2%，砂之含量為 99.3%。有效粒徑 D10=0.17mm， D30=0.33mm，D60=0.35mm，可以推得砂土之均勻係數 Cu=2.08，級配係數 Cc=0.90。根據統一土壤分類法為級配不良砂 SP。由試驗所得砂土的平均比重 Gs=2.65，最大乾密度、最小乾密度分別為 1.67 及 1.47(g/cm3)。因此砂土之最大、最小孔隙比 emax、emin 分別為 0.83 及 0.59。

使用越南石英砂作為砂箱實驗模擬材料之研究眾多，其中周坤賢（1998）曾針對此類越南石英砂進行了一系列的力學試驗。其實驗包含：(1)盒式直接剪力試驗；(2)單剪試驗(simple shear test)；(3)多段式三軸排水試驗等。由各組試驗所得到之砂土剪力強度整理，如圖 2.3.16 所示。其結果顯示，隨砂土相對密度由 55%增加 100%，抗剪角由 35˚增加 41˚。雖然隨實驗方法不同，抗剪角約有 0.5-1˚之變化，但其影響並不明顯。

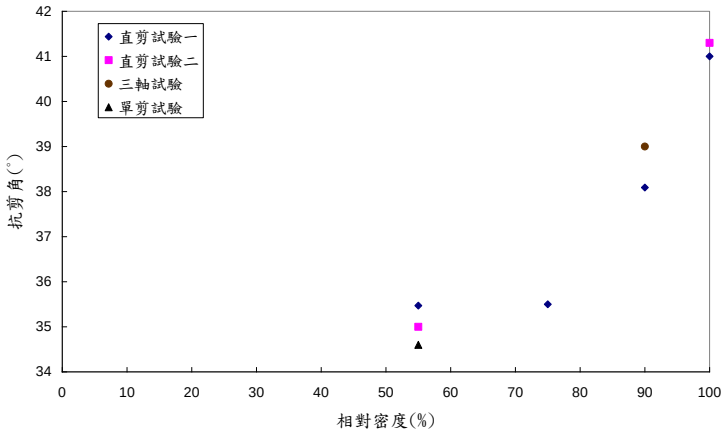
鍾春富(2007)已確認本研究選用之砂土性質與周坤賢（1998）相似。因此針對此類砂土的基本物理性質與力學性質進行測試。並與周坤賢（1998）之實驗結果比對，以確認所採用石英砂的物理性質及力學性質相當。則砂土材料之力學性質方面，可引用作為分析參考。

在物理實驗方面，共計進行比重試驗、粒徑分析試驗、最大乾密度試驗及最小乾密度試驗等基本物性試驗等。由基本物性試驗結果，與周坤賢（1998）針對此類石英砂性質之試驗結果頗為一致，如表 2.3.5 所示。

在力學實驗方面，針對所砂土進行盒式直接剪力試驗，以求取砂土之抗剪角 ，並與周坤賢（1998）所得之試驗成果作一比較。由不同相對密度與抗剪角之關係，求得砂土在不同相對密度下之抗剪角 ，如圖 2.3.17 所示。

表 2.3.5 越南石英砂物理參數實驗結果

參數		周坤賢(1998)	鍾春富(2007)
粒徑分析	礫石含量(%)	0	0
	砂含量(%)	99.3	99.8
	細料含量(%)	0.7	0.2
比重 G_s		2.65	2.65
統一土壤分類		SP	SP
最大乾密度 g /cm^3		1.66	1.67
最小乾密度 g /cm^3		1.44	1.47
最大孔隙比 e_{max}		0.84	0.80
最小孔隙比 e_{min}		0.60	0.59
摩擦角 ϕ		35˚~41˚	34°~38°



直剪試驗:相對密度 55%、75%、90%、100%

直剪試驗二:重覆性試驗相對密度 55%、100%

圖 2.3.16 越南石英砂之相對密度和抗剪角的關係(鍾春富，2007)

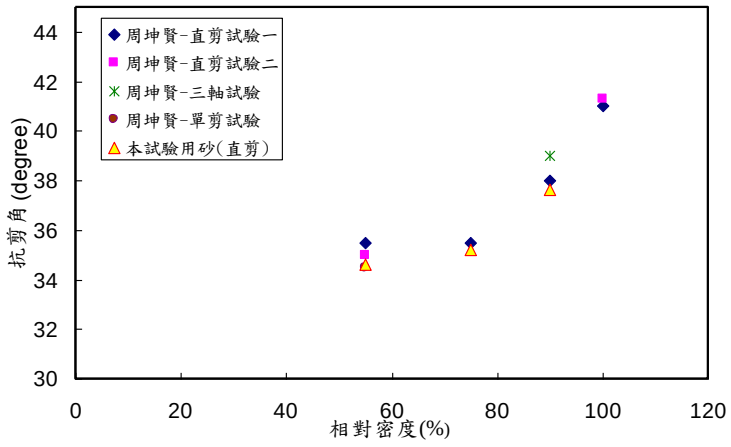


圖 2.3.17 越南石英砂之相對密度和抗剪角的關係(鍾春富，2007)

2.4 數值模擬

本研究除了以物理模型進行試驗之外，尚規劃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)之數值模擬。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，本研究以 PFC2D 為正、逆斷層主要分析工具，並以 PFC3D 為橫移斷層之分析工具。

2.4.1 離心機砂箱模型

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 2.4.1 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體，進行 PFC2D 的數值模擬。建構的數值模型的邊界條件如圖 2.4.2(a)及圖 2.4.2(b)所示，而建構的正斷層數值模型的邊界條件如 2.4.2(c)所示。砂箱的尺寸，設定為長×高=100 公分×35 公分。模型中分為 Wall 1~Wall 4，各部分尺寸如下：

Wall 1：邊界牆，長 35cm，牆可沿 fault dip direction 移動。

Wall 2：逆斷層長 25cm；正斷層長 50cm，牆可沿 fault dip direction 移動。

Wall 3：逆斷層長 75cm；正斷層長 50cm。

Wall 4：邊界牆，長 35cm。

Wall 5：斷層面牆。

利用數值方法來建立數值顆粒土層的堆積，其步驟如下：

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。本研究數值顆粒土層共有半徑 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。

斷層數值模擬顆粒土層厚度為 20cm(與物理模型之土層高度相同)，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對K_n數值的影響(K_n數值隨覆土應力的增加而增加)，因此本研究選用的數值模擬的參數如表 2.4.1。

2.4.2 橫移斷層砂箱模型

本研究所使用之橫移斷層數值模擬模型尺寸為 33cm×22cm×10cm ，其大小完全比照物理實驗所使用之砂箱，圖 2.4.3 為示意圖，斷層傾角設定為 90 度。為了表示模擬砂土之顆粒在模擬過程中之位移情形，沿著斷層錯動的方向我們定義

為 Y，平行地表並與斷層錯動方向垂直的方向定義為 X，而從砂箱盒高度的方向則定義為 Z。表 2.4.2 則為所此模擬中所使用之微觀參數。本研究利用實降方法來建立高度為 5cm 的數值顆粒土層的堆積，其步驟為先生成顆粒，其後給予重力並進行實降，待實降完成後，將高度超過 5cm 之顆粒刪除，並再次達到平衡即完成橫移斷層的數值模擬準備。為了方便觀察剪切帶的位置及變化，從俯視的角度看下去，每隔 2cm 的藍色砂層插一層 1cm 的黃色砂層，如圖 2.4.4 所示。

2.4.3 山腳斷層現地模型

由鑽探資料可以發現山腳斷層附近之基盤深度可從數十公尺至 700 公尺不等(Lin CZ, 2005)，若地表假設均在 0 公尺之位置，則沉積物之厚度便在數十公尺至 700 公尺不等；在覆土層較厚之處，沉積物必定是在斷層錯動前後進行多次沉積，緩慢增加沉積物之厚度。因此，既然非一次沉積，探討多次沉積實屬必要。本研究之山腳斷層現地數值模擬係參照台北盆地內之鑽孔剖面(圖 2.4.5)中五股剖面的結果。

如圖 2.4.6 所示為五股剖面，SCF-2 與 WK-1E 之水平距離約為 650 公尺，SCF-2 之基盤深度為 157.64m，而 WK-1E 的基盤深度達到 675m。根據劉桓吉(2000)的研究指出，在 SCF-2 岩心中可以看到 137m 至 156.3m 的互層構造呈現層面傾斜及正斷層的小構造，其層面的傾角由淺而深，逐漸變陡，推測此一構造可能是山腳斷層上盤的未固結沉積物，受到山腳斷層下滑時的拖曳作用造成。林朝宗(2001)則指出，由 SCF-2 井下岩心可知在斷層面上 20 公尺範圍內的台北盆地第四紀砂泥層仍受到斷層活動的影響。本研究根據以上之研究進行生長斷層數值模擬，基於以下幾點假設：

1. 基盤每次錯動 2.5m，亦即此處的上盤基盤總共經歷了 169 次錯動陷落
2. 此處的上下盤也經歷了同樣次數的沉積而形成 169 層生長地層。
3. 為達上盤(WK-1E)基盤 675m 的厚度，上盤每次生長 4m。
4. 為達下盤(SCF-2)的基盤 157m 的厚度，上盤應每次生長 1m。但由於研究之初誤植數據，因此在本研究中上盤每次生長 1.5m。此一誤植的數據將

於明年的研究中改進。

169 層生長斷層數值模擬的過程如圖 2.4.7 所示，本研究使用 PFC2D 中的牆(wall)元素當作基盤、基盤中的斷層面及左右邊界，左右邊界在初始狀態相隔 250m，基盤破裂於中間(125m)的位置，而整個生長斷層在經歷 169 次的上盤基盤錯動陷落及生長層沉積的交替之後，左右邊界最後相隔 500m，上盤覆土厚度 253.5m，下盤覆土厚度 676m。

山腳斷層樹林剖面數值模擬所選用之微觀參數如表 2.4.3 所示，為考慮覆土應力對K_n數值的影響，第 169 層生長層所使用之K_n為K_{n0}，K_{n0}之值與離心機砂箱模擬所使用之K_{n0}相同，而第 1 至 168 層的生長層每一層所使用的顆粒的K_n皆根據其最終深度給於一修正係數，修正公式與離心機砂箱模型所使用之公式相同。

表 2.4.1 PFC2D 模擬離心機砂箱模型的微觀參數

Parameters	Values
Normal stiffness, K_n (N/m)	$K_n = K_{no}(\frac{\sigma'_v}{\sigma'_{vo}})^{0.4}$; K_{no}=$0.5 \times 10^7\ N/m$
Shear stiffness, K_s (N/m)	$1/3K_n$
Normal & shear stiffness of walls	$6.0 \times 10^{12}\ N/m$
Friction coefficient of between disks	0.73 ($\varphi = 36^o$)
Friction coefficient of between disks and wall	0.0
Density of disks (kg/m^3)	1850
Local damping coefficient	0.7 (default)

表 2.4.2 PFC2D 模擬橫移斷層砂箱模型的微觀參數

Parameters	Values
Normal stiffness, K_n (N/m)	$K_n = 0.5 \times 10^7\ N/m$
Shear stiffness, K_s (N/m)	$1/3K_n$
Normal stiffness of walls	$6.0 \times 10^{12}\ N/m$
Shear stiffness of walls	$6.0 \times 10^{12}\ N/m$
Friction coefficient of between disks	0.73 ($\varphi = 36^o$)
Friction coefficient of between disks and wall	0.0
Density of disks (kg/m^3)	2600

表 2.4.3 PFC2D 模擬山腳斷層現地模型的微觀參數

Parameters	Values
Ball radius/percentage of weight (m/%)	1.0m/(25%)、0.9 m/(25%)、0.8 m/(25%)、0.7 m/(25%)
Normal stiffness of ball, K_n (N/m)	$K_n = K_{no}(\frac{\sigma_v'}{\sigma_{vo}'})^{0.4}$；$K_{no}$=4.08 × 10^6 N/m
Shear stiffness of ball, K_s (N/m)	1/3K_n
Normal stiffness of wall	6.0 × 10^{12} N/m
Shear stiffness of wall	6.0 × 10^{12} N/m
Friction coefficient of between ball	0.577 ($\varphi = 30^o$)
Friction coefficient of between ball and side wall	0.0
Friction coefficient of between ball and base wall	0.364
Density of ball (kg/m^3)	2600
Local damping coefficient	0.7 (default)

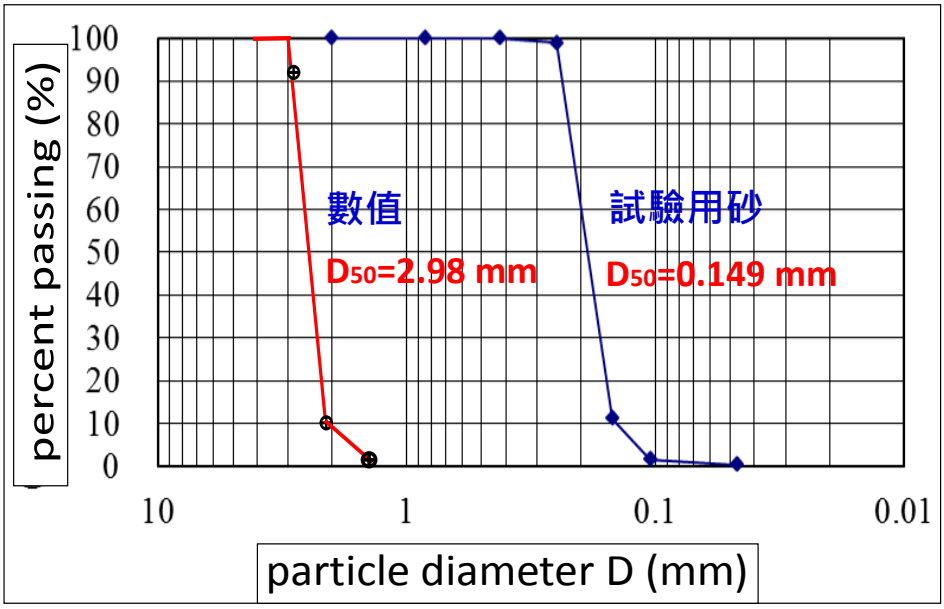
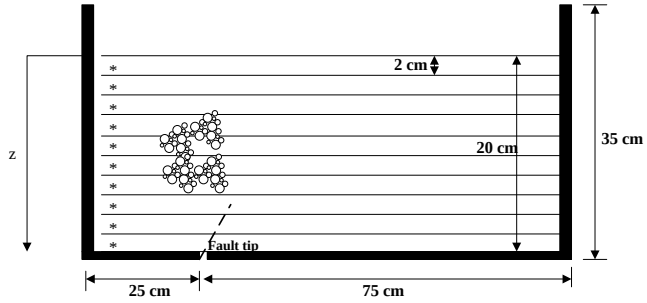
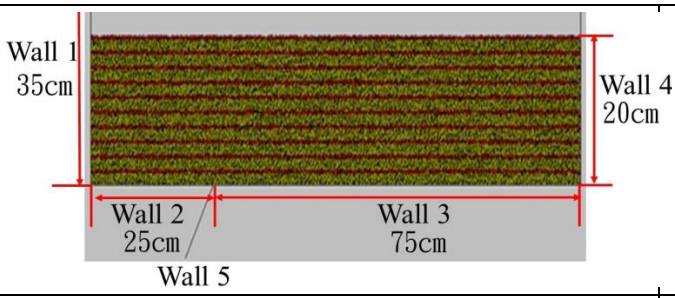


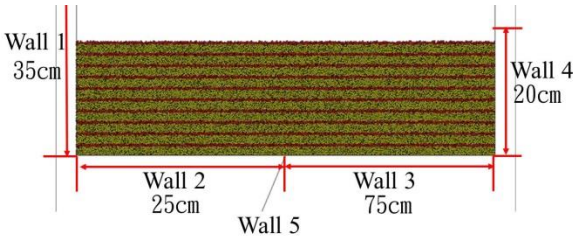
圖 2.4.1 數值模擬所使用的顆粒與試驗石英矽砂的篩分析曲線之比較



(a)正逆斷層數值模擬之模型尺寸



(b)建構完成的逆斷層數值模型及分層示意圖



(c)建構完成的正斷層數值模型及分層示意圖

圖 2.4.2 離心機正逆斷層數值模擬之模型尺寸及分層

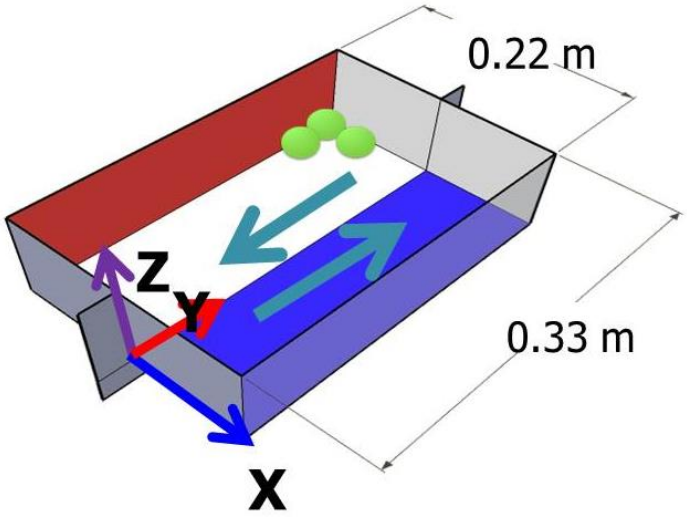


圖 2.4.3 橫移斷層數值模擬之模型尺寸

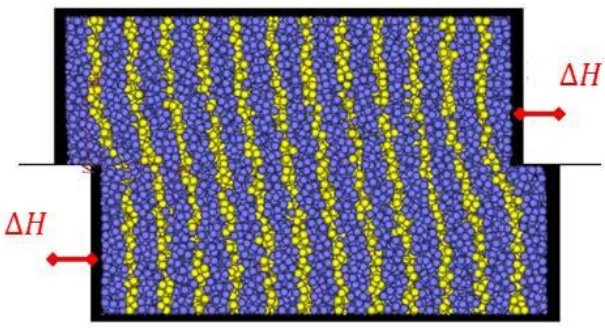


圖 2.4.4 橫移斷層數值模擬砂箱之分層示意圖(俯視圖)

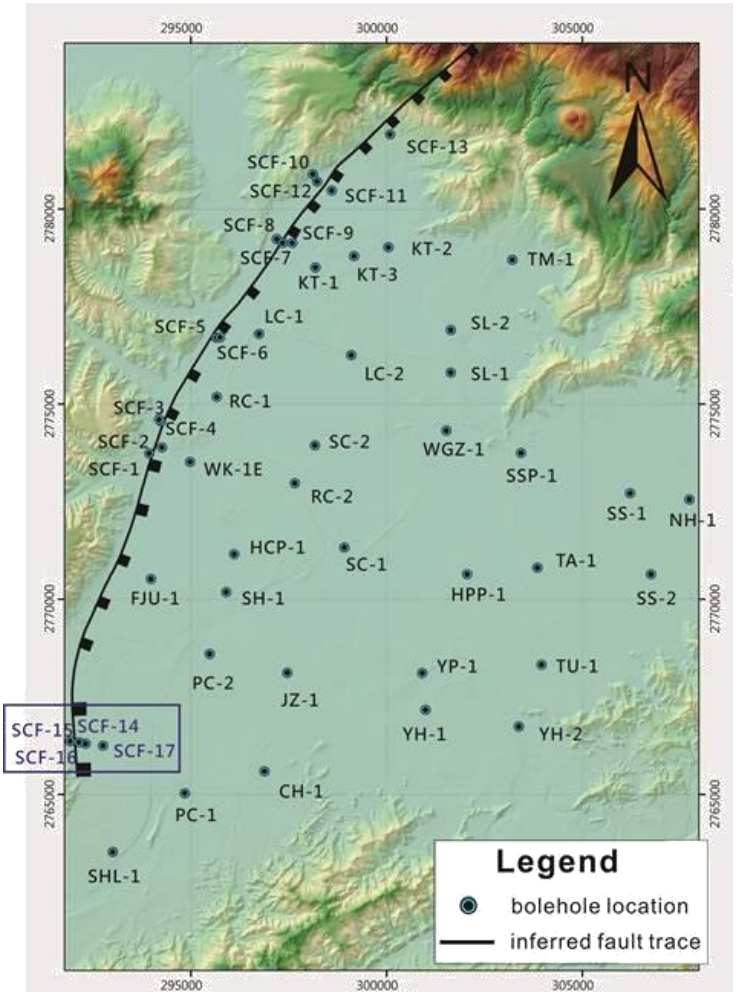


圖 2.4.5 五股剖面鑽孔位置圖

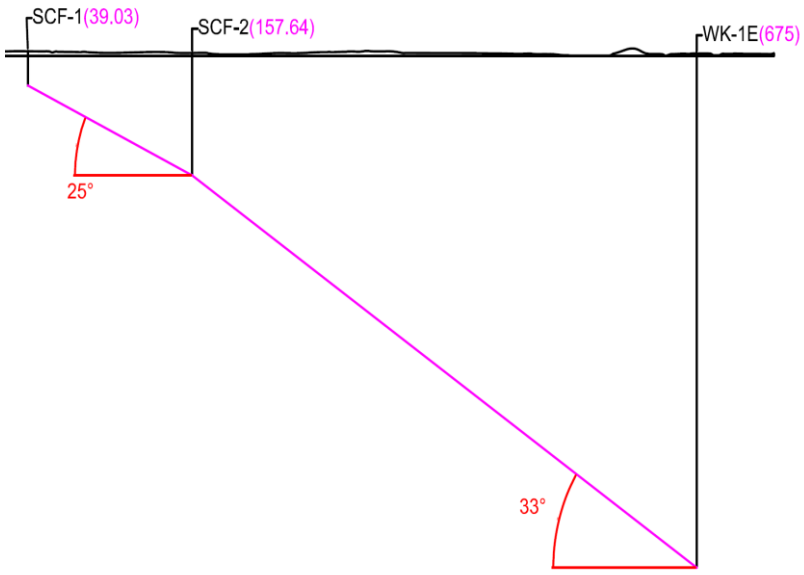
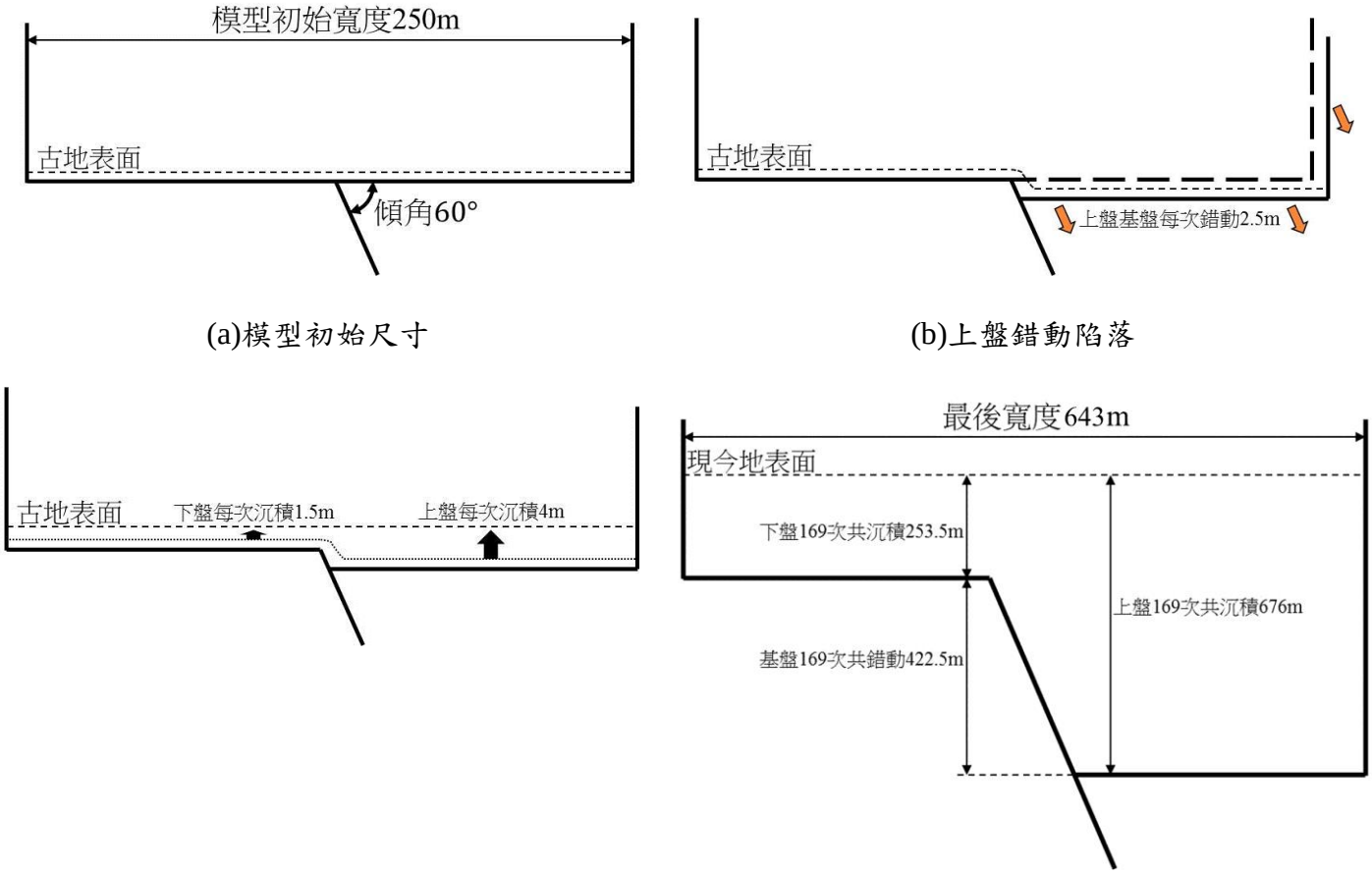


圖 2.4.6 五股剖面鑽井資料



(a)模型初始尺寸　　(b)上盤錯動陷落

(c)生長層沉積　　(d)模型最後尺寸

圖 2.4.7 山腳斷層現地尺寸數值模擬流程及尺寸

2.4.4 微觀參數與物理實驗校核

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，利用離心模型試驗自重壓密階段的試驗結果，來率定(calibration)PFC2D 數值模擬所需的微觀參數，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 的數值模擬，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。

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 PFC2D 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 PFC2D 準確模擬砂土行為重要的第一步。圖 2.4.8 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(2000)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。為了簡化問題，本研究假設堆積體為等向，則上述關係寫成

$$E = E_v = E_h = \frac{4r^2N}{9V}\left[\frac{15K_nK_s}{2K_n+3K_s}\right] \quad \text{(Eq.2.4.1)}$$

$$G = G_{vh} = G_{hv} = \frac{4r^2N}{9V}\left[\frac{15K_nK_s}{6K_n+4K_s}\right] \quad \text{(Eq.2.4.2)}$$

$$\nu = \nu_{vh} = \nu_{hv} = \frac{K_n-K_s}{2K_n+3K_s} = \frac{\frac{K_n}{K_s}-1}{(2\frac{K_n}{K_s}+3)} \quad \text{(Eq.2.4.3)}$$

$$K_s = \frac{1-2\nu}{1+3\nu}K_n \quad \text{(Eq.2.4.4)}$$

其中$\frac{4r^2N}{9V} = f(e)$=孔隙比的函數。

利用上述四個方程式，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 Eq.2.4.1 至 Eq.2.4.4 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，在固定$K_n/K_s$比值的情況下，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。

$$\varepsilon_v = \frac{\sigma_v}{E} - \nu\frac{\sigma_h}{E} \quad \text{(Eq.2.4.5)}$$

$$\because\ \varepsilon_h = \frac{\sigma_h}{E} - \nu\frac{\sigma_v}{E} = 0 \quad \text{(Eq.2.4.5-a)}$$

$$\therefore\ \sigma_h = \nu\sigma_v \quad \text{(Eq.2.4.5-b)}$$

$$\varepsilon_v = \frac{\sigma_v}{E} - \nu^2\frac{\sigma_v}{E} \quad \text{(Eq.2.4.6)}$$

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),MPFC,的定義如下：

$$M_{\text{PFC}} = \frac{\sigma_v}{\varepsilon_v} = \frac{1}{(1-\nu^2)}E = \frac{1}{(1-d^2)}\frac{4r^2N}{9V}\frac{15K_n}{3+2c} = f(e)AK_n \quad \text{(Eq.2.4.7)}$$

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 Ko 狀態，因此：

$$\varepsilon_v = \frac{\sigma_v}{E} - 2\nu\frac{\sigma_h}{E} \quad \text{(Eq.2.4.8)}$$

$$\because\ \varepsilon_h = \frac{\sigma_h}{E} - \nu\frac{\sigma_h}{E} - \nu\frac{\sigma_v}{E} = 0 \quad \text{(Eq.2.4.8-a)}$$

$$\therefore \sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu}\sigma_v \quad \text{(Eq.2.4.8-b)}$$

$$K_o = \frac{\nu}{1-\nu} = 1 - sin\phi' \quad \text{(Eq.2.4.8-c)}$$

利用試體床的內摩擦角(41^o)，可以求得在靜止土壓力狀態下的柏松比(0.227)。代入 Eq.2.4.4 可以得到$\frac{K_n}{K_s} = 3.07$。

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

$$M_{centrifuge} = \frac{\sigma_v}{\varepsilon_v} = \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}E = \frac{(1-d)}{(1+d)(1-2d)}\frac{4r^2N}{9V}\frac{15K_n}{3+2c} = f(e)BK_n \quad \text{(Eq. 2.4.9)}$$

其中 B 為常數。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 進行數值顆粒土層自重壓密階段(1g-80g)的數值模擬，可以以不同的微觀參數進行數值模擬，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 數值模擬可以相輔相成，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：

$$M = N\sigma_z^m \qquad \text{(Eq.2.4.10)}$$

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，$\mu = \tan\phi_\mu = \tan 36^o = 0.73$。

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，$\mu = \tan(36^o)$ =0.73，改變不同的K_n值以及不同的 m 值，進行 PFC2D 的自重壓密的數值模擬。數值模擬時，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模擬，圓盤密度則輸入 10ρ，ρ為圓盤的密度。

圖 2.4.9 為自重壓密階段數值模擬所計算之沈陷量與離心模型量測沈陷量之比較，而圖 2.4.10 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 數值模擬（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 μ =0.73，利用這三個 PFC2D 的微觀參數，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。

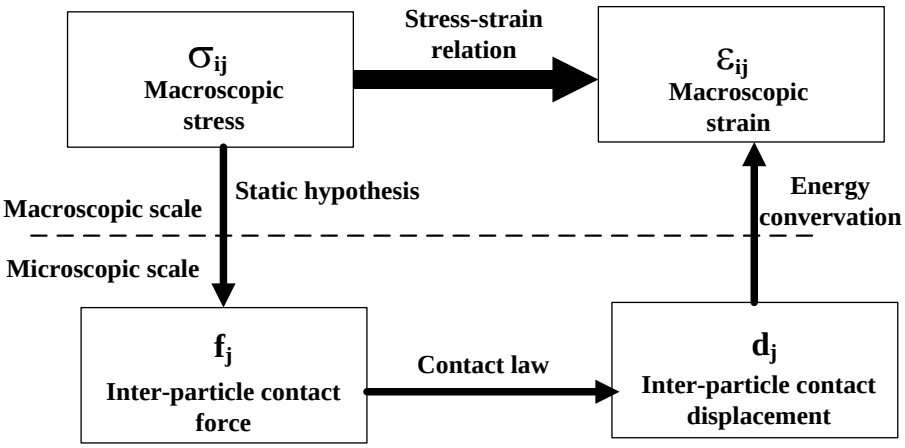


圖 2.4.8 微觀模式組成率與巨觀模式組成律間的關係

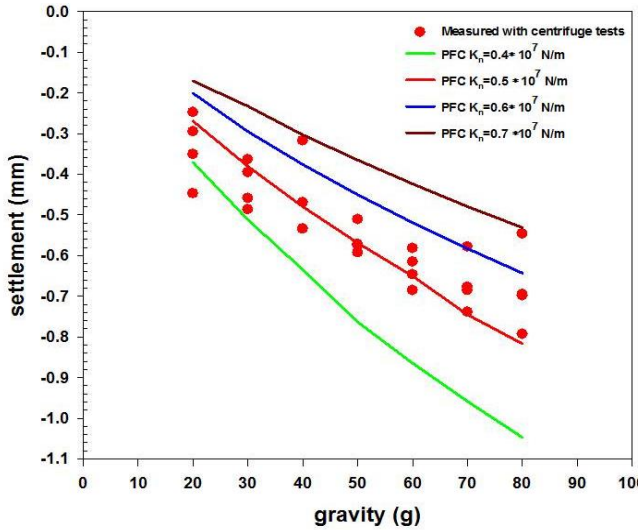


圖 2.4.9 自重壓密數值模擬所計算之沈陷量與離心模型量測沈陷量之比較

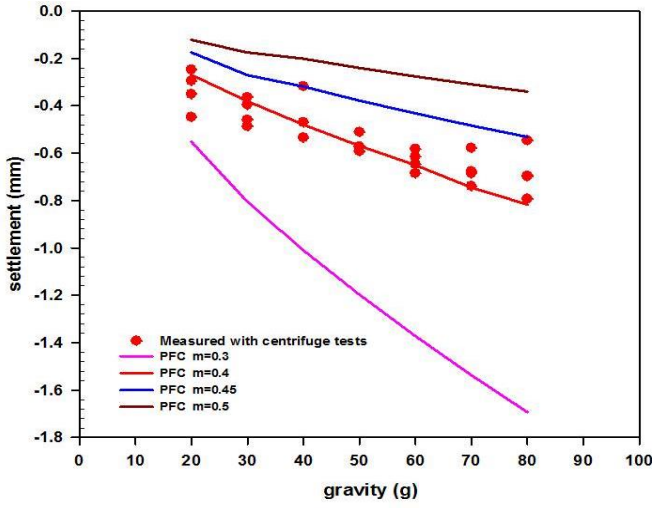


圖 2.4.10 自重壓密不同 m 值，數值模擬之沈陷量與離心模型量測沈陷量之比較

第三章、研究成果

3.1 現地調查

3.1.1 國內橫移斷層案例

1951 年 10 月 22 日花蓮地區發生兩起強震，規模分別為 Ms7.4 及 Ms7.2，米崙斷層為此次地震的造震斷層，是一左移兼具逆衝分量約呈南北向的橫移斷層，由花蓮縣七星潭海岸向南延伸至花蓮市美崙山西南側(圖 3.1.1)，長約 8 公里。

花蓮市位在縱谷平原北端，是由花蓮溪與米崙溪沖積而成的一寬平的沖積扇，米崙溪東側為米崙台地。本區地層由老至年輕，包括米崙鼻礫岩、米崙山礫石、米崙層、花蓮層及階地堆積層沖積層；前三層以礫岩或礫石層為主，後兩者為近期的沖積層，其中花蓮層為米崙台地上最年輕的沖積層(林啟文等，2009)。在米崙台地—花崗山與沖積平原間一線型的斷層崖地形，北段位置從七星潭海岸經北浦機場與東華大學，轉向西南沿著美崙山西側至美崙溪，走向約呈北東；南段由美崙溪朝東南延伸，經明禮國小、花蓮署立醫院後側的崖坡，經明禮路至花崗國中內，沿著花崗山西側崖坡，呈現走向約為北西 10 度的線型崖。

米崙斷層曾於 1983-1988 年實施三邊測量網的觀測及 1985-1988 年一條跨越米崙台地北區的水準線測量。斷層運動學模擬分析顯示，現階段米崙台地地區的震間期地殼變形，將米崙台地視為海岸山脈的一部份，所得模擬之最佳值顯示斷層向東傾 51 度，斷層滑移的地表鎖定深度為 1.3 公里，相對西側縱谷，幾乎沒有抬升量(4.4±3.3mm/yr)，水平位移是以 N3°±4°W 接近正北的方位，以 28.5±3.0mm/yr 移動（Yu et al., 1990）。淺層震測施測結果為米崙斷層緊鄰米崙台地的西緣邊界活動，斷層走向為北偏東 35 度，為一高角度東傾左移逆衝斷層，斷層面傾角介在 60-70 度間，上下盤的岩性截然不同。而米崙台地除近地表為近代沉積外，以米崙礫岩為主體，無層狀沉積，故震測無法求得台地深部構造(廖宏祥，2006)。經不同方法所推測歸納，米崙斷層面呈高角度東傾，傾角介在 50-70 度間。

1951 年縱谷斷層地震序列，地表出現三條破裂帶，分別為地調所彙整活動斷層中的米崙斷層、玉里斷層及池上斷層，根據古文獻紀錄，造成約 85 人死亡，300 多人受傷，該年地震序列由發生地點及先後順序，有由北往南的趨勢(圖 3.1.2)。由兩次強震造成的花蓮市地表破裂，據前人野外調查結果(圖 3.1.3 至 3.1.5)，斷層跡自七星潭海岸起，經北埔機場南端公路至美崙山下忠烈祠橋頭後分為三段，一段由明禮國小經花崗國中至南濱海面；一段經花蓮法院、縣政府後方、鐵路車庫至南濱水門；另一段經過郵局、市場旁鐵路至中華路與第二段會合(圖 3.1.6)(林啟文等，2009)。此次地震米崙斷層於地表錯移量左移達 2 公尺，垂直抬升量達 1.2 公尺。

根據經濟部中央地質調查所重要活動斷層構造特性調查研究計畫之期末報告(陳文山等，2012)，斷層跡位置應修正為如圖 3.1.7 紅色實線，沿米崙台地、米崙山與花崗山西側的崖坡，其南端 1951 年報導的地表破裂跡，無地形特徵，恐非長期活動的位置。另外，米崙台地表面的全新世沉積物為海灘相砂礫石與局部珊瑚礁，從海拔高度 12 公尺珊瑚礁的碳十四定年年代為 2620-2300yr BP（Yamaguchi and Ota, 2004），估算長期抬升速率約 5 mm/yr(陳文山等，2012)。

由地表破裂分析與地形分析結果，現今地形地貌可能有多次的活動跡象，但地表上並未發現米崙斷層的露頭，且由地形地質與地球物理探查結果，沒有發現斷層延伸過吉安溪(林啟文等，2009)。

3.1.1.1 米崙斷層槽溝開挖

中央地質調查所於 2004 年在花蓮機場附近槽溝開挖結果，剖面中的沉積物可分成四類，分別是回填土、S1 砂土層、S2 砂土層及 S3 砂層(圖 3.1.8)，崖面呈一單斜褶皺，未在槽溝中發現 1951 年的地震變形特徵，研判米崙斷層可能於槽溝西側(林啟文等，2009)。

陳文山等人於 2012 年在花崗山西側崖坡開挖槽溝，分別為花崗山一號與二號槽溝，各挖掘 1-2 階，深度為 2-3 公尺，兩槽溝相距約 18 公尺(圖 3.1.9、圖 3.1.10)。從槽溝剖面(圖 3.1.11、圖 3.1.12)的地層分析認為，M1 層沉積之後，地層產生褶

皺變形；O 層（660－<300yr BP）在二號槽溝北牆呈現變形，垂直變形量至少 80 公分，應在沉積之後受到斷層活動影響；但是一號槽溝中卻呈現水平狀態，推測近期的變形帶可能發生在一號槽溝剖面的東側，未挖掘到(陳文山等，2012)。

因此，1951 年花蓮地震所造成的地表破裂，無法由目前的開挖槽溝明確知道其位置與變形型態。

3.1.1.2 米崙斷層現地調查

依照 1951 年紀錄的地表變形位置(圖 3.1.1、圖 3.1.6)(朱傚祖與游明聖，1995；林啟文等，2009)或前人所述位置(楊蔭清，1953；徐鐵良，1955)，米崙斷層北區段有經過東華大學美崙校區內，據東華大學美崙校區的行政人員描述在校內的五守樓至體育館間的地板及人造建物間斷續地有出現裂縫，走向大約呈北北東—南南西，約略與米崙斷層平行(圖 3.1.13)。

本研究團隊至東華大學美崙校區內出現地表破裂之位置點與裂隙方向進行詳細的調查與紀錄，有明顯地表裂隙的位置主要是在五守樓(圖 3.1.14)與體育館外側地面(圖 3.1.15)。在五守樓的一樓地面可以觀察到至少十道地表裂隙，其中幾道裂隙延伸性較好，可達 2 公尺以上，這些裂隙以五守樓中庭做為區隔點，中庭兩側裂隙約相差 90 度(圖 3.1.16)，裂隙方向如表 3.1.1、圖 3.1.17。除五守樓一樓地面有裂隙外，在一樓左右兩側的廁所外牆上有疑似受地震搖晃加上建築物本身結構問題造成的裂隙(圖 3.1.18)；在五守樓地下室，於左側舖有塑膠板，無法觀察是否有裂隙，僅在小房間內塑膠板被掀起處觀察到一道裂隙，而右側則未觀察到有地面裂隙。在體育館的部分，裂隙出現在體育館外斜坡上，裂隙方向介在 N10°W~N10°E 間(圖 3.1.19)，裂隙旁的體育館外牆也可觀察到一道裂隙(圖 3.1.20)，但此道裂隙在體育館內部並未觀察到。另外，在五守樓北側草皮的階梯上，也發現了幾道裂隙，裂隙在階梯最上方相連在一起，判斷與結構物本身較有相關。在東華大學內觀察到幾個有較明顯出現裂隙位置及裂隙方向與前人所述之米崙斷層破裂跡看似有些許相關，但在經由實際現地調查後，初步認為這些裂隙與建築物結構或施工不當較為相關，與米崙斷層潛移造成之近地表變形較無相關。

另外，研究團隊也有前往花崗國中，進入該國中正在興建之建築工地，圖 3.1.21 為現勘照片，在其開挖的工地之中，土層幾乎呈水平，並沒有發現斷層通過或是錯動現象。

表 3.1.1 東華大學五守樓及體育館裂隙資料統整

裂隙出現地點	裂隙方向	列隙長度(cm)	裂隙平均開口寬(cm)	裂隙型態
五守樓中庭左側	N10°W~NS	220~340	0.8	開張型
五守樓中庭右側	N70°E~ N80°E	180~310	0.5	開張型
體育館	N10°W~N10°E	230	1.5	開張型



圖 3.1.1 米崙斷層條帶地質圖(林啟文等，2009)

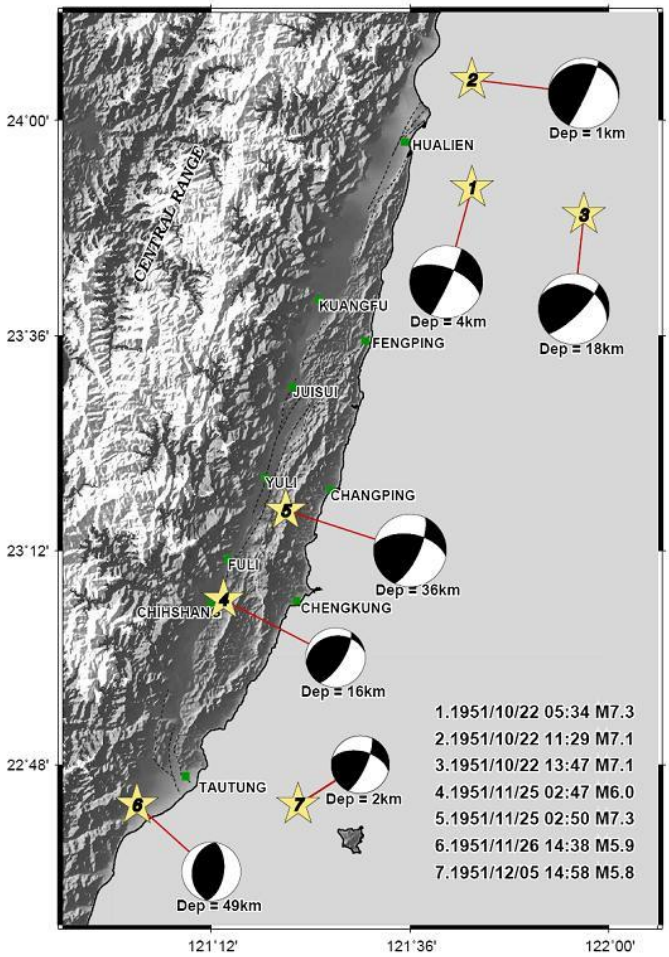


圖 3.1.2 1951 年縱谷斷層地震序列(Cheng et al.,1996)



圖 3.1.3



圖 3.1.4

圖 3.1.3 1951 年花蓮地震於花蓮七星潭民房內隆起 40 公分(鄭世楠提供)

圖 3.1.4 1951 年花蓮地震而出露之米崙地震斷層露頭，隆起高達 1.2 公尺(鄭世楠提供)

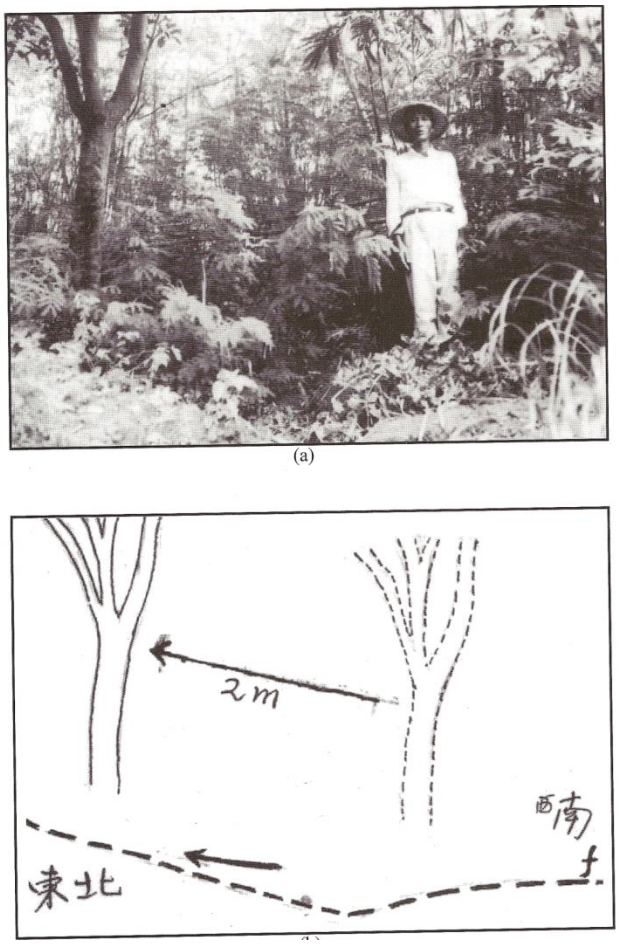


圖 3.1.5 1951 年花蓮地震造成水平錯移高達 2 公尺(鄭世楠提供)

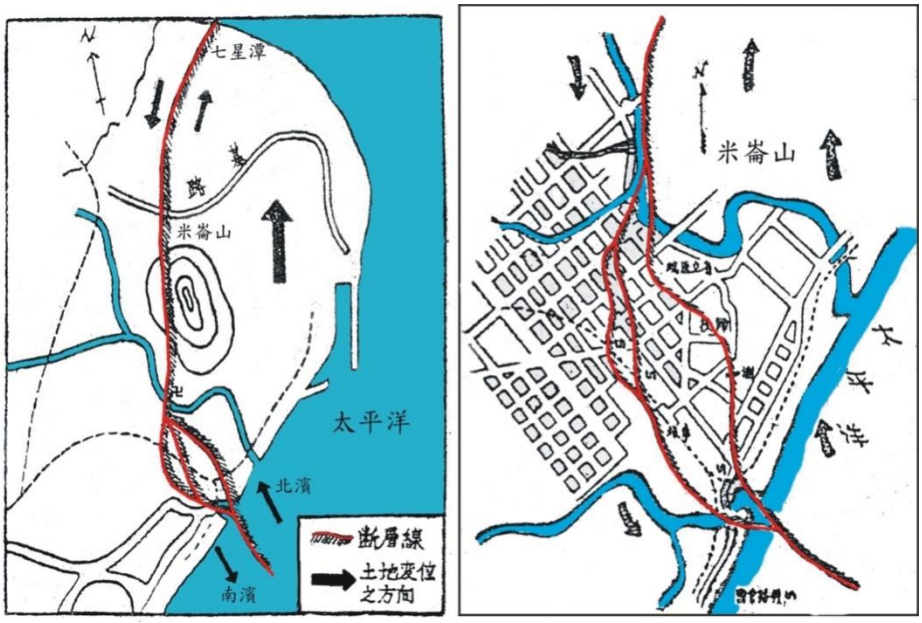


圖 3.1.6 1951 年地震米崙斷層的地表破裂圖(林啟文等，2009)



圖 3.1.7 1951 年地震地表變形帶位置(陳文山等，2012)

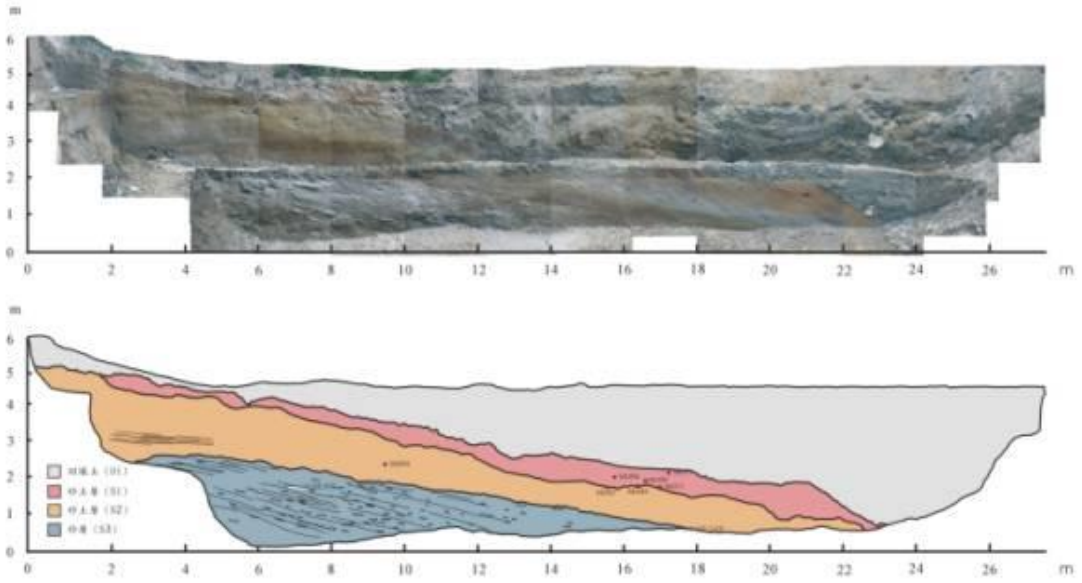


圖 3.1.8 米崙斷層機場槽溝開挖結果，剖面(南牆)未有斷層通過的跡象(陳文山等，2004)



圖 3.1.9 花崗山一號與二號槽溝位置圖(陳文山等，2012)



圖 3.1.10 花崗山一號與二號槽溝位置照片(詹佩臻攝)

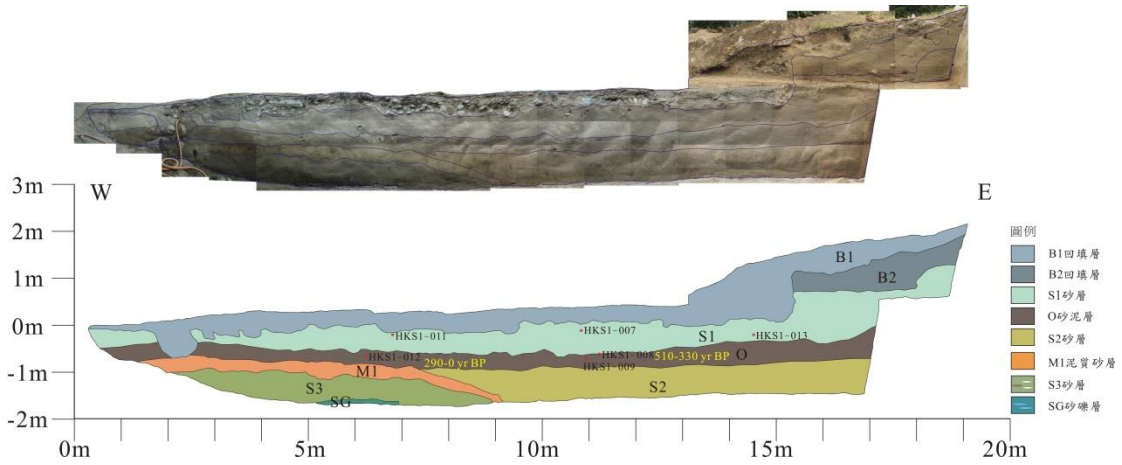


圖 3.1.11 花崗山一號槽溝北牆(陳文山等，2012)

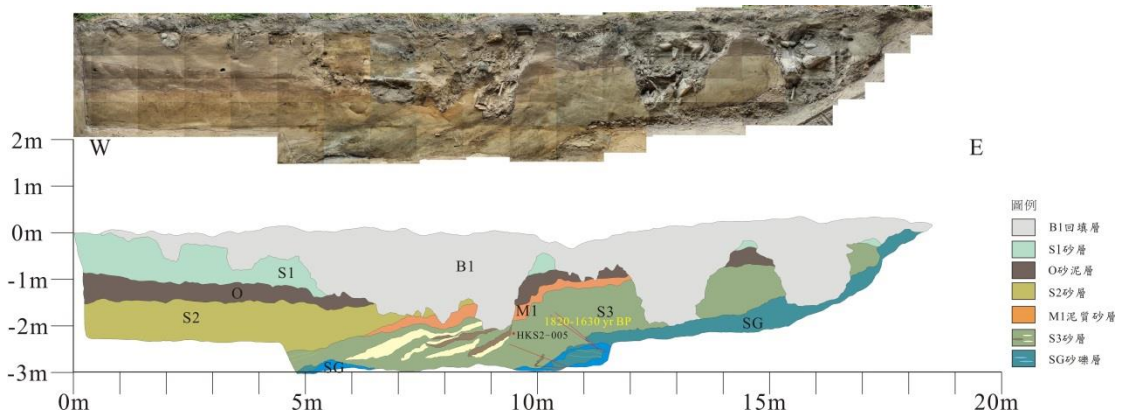


圖 3.1.12 花崗山二號槽溝北牆(陳文山等，2012)

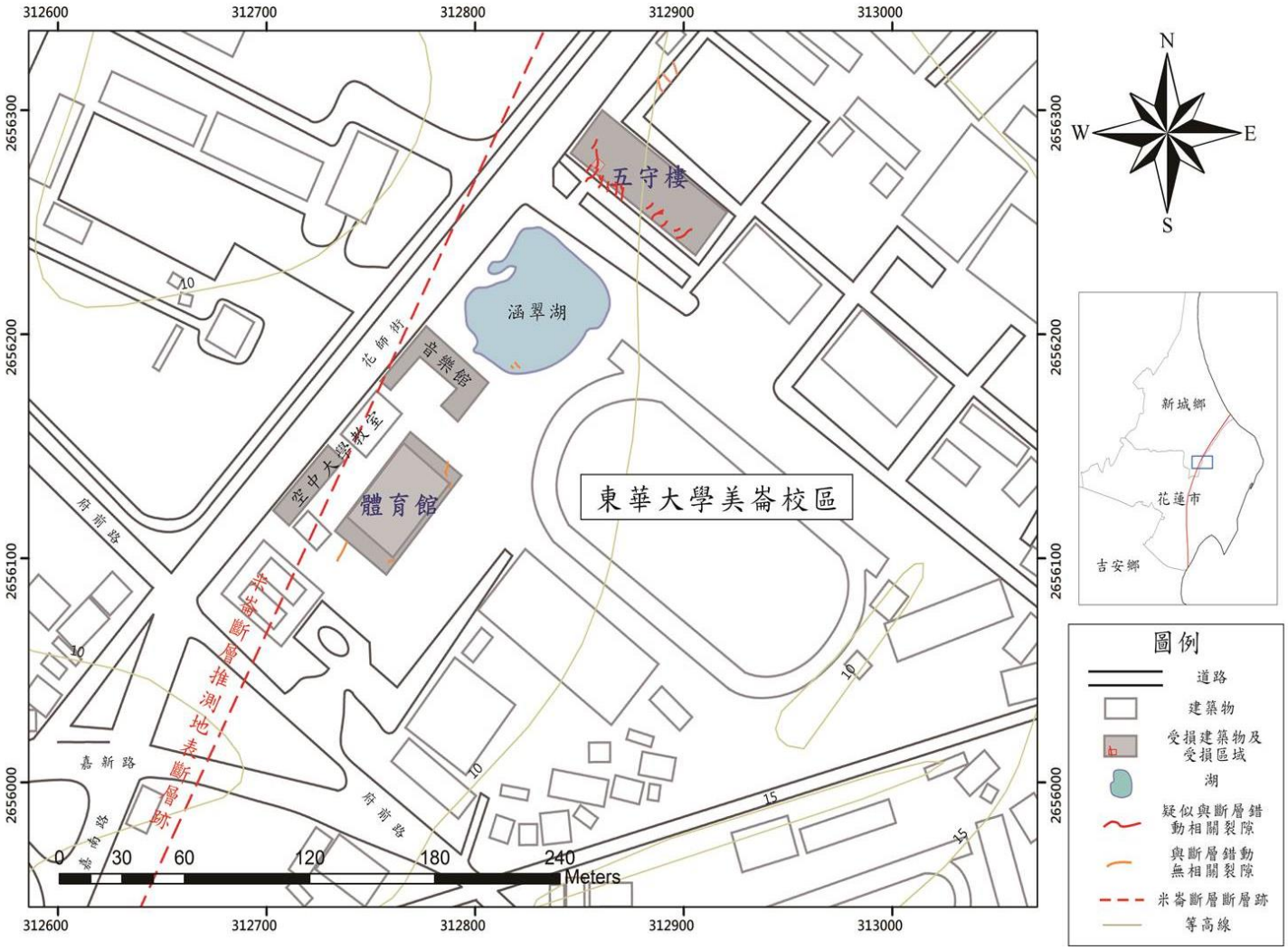


圖 3.1.13 米崙斷層推測地表破裂跡與東華大學美崙校區位置圖



圖 3.1.14 東華大學美崙校區五守樓



圖 3.1.15 東華大學美崙校區體育館



圖 3.1.16 東華大學美崙校區五守樓裂隙情況

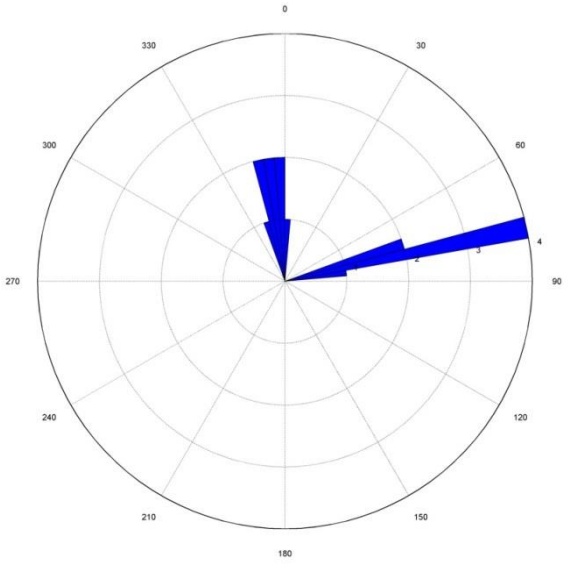


圖 3.1.17 東華大學美崙校區五守樓裂隙方向統整玫瑰圖

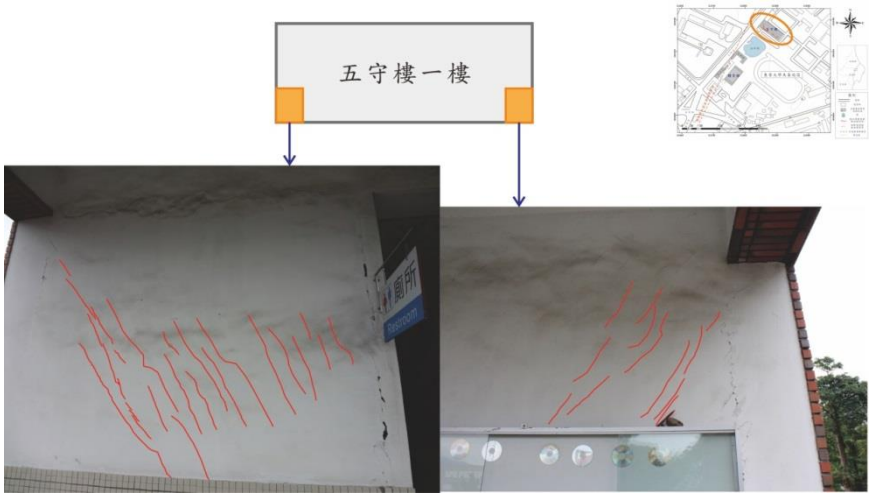


圖 3.1.18 東華大學美崙校區五守樓一樓左右兩側廁所外牆上裂隙情況



圖 3.1.19 東華大學美崙校區體育館外圍斜坡上地表裂隙



圖 3.1.20 東華大學美崙校區體育館外圍牆上裂隙

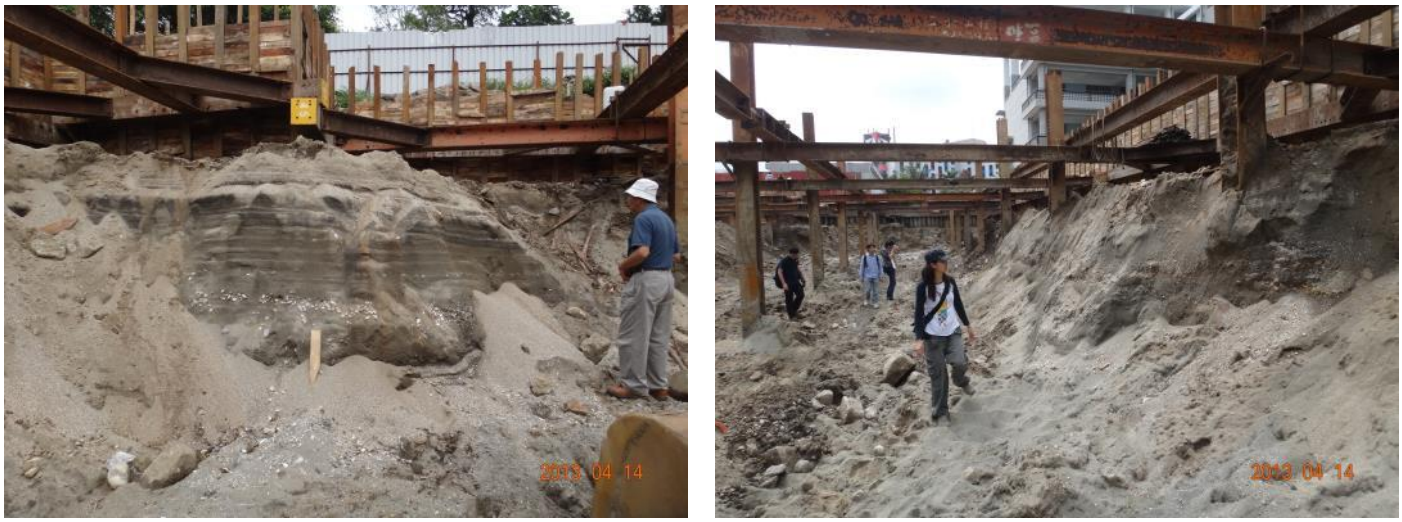


圖 3.1.21 花崗國中建築工地現勘照片

3.1.1.3 米崙斷層鑽探資料整理

米崙斷層主要位於花蓮市區內，由經濟部中央地質調查所的資料可以得知，其於市區內之長度約為 7.5 公里，經檢視國家地震中心所設置強震測站與米崙斷層相對位置可以得知，共有 9 處之強震測站鄰近米崙斷層，如圖 3.1.22 所示，其詳細位置如表 3.1.2 所示。

統整以上現有之工程鑽探資料可以得知，花蓮商職附近強震測站(HWA008)之土層分佈狀況，地表 1 公尺內大多為人工回填土，地表下 1 公尺到地表下約 12 公尺處大多為砂礫石夾灰色粗至細砂，地表下 12 公尺到本處鑽探最深度大多為灰色粉土質夾砂；明義國小(HWA010)部分，地表 1 公尺內大多為回填材料，地表下 1 公尺處可發現一薄層粉土質，其下方為砂礫石並夾雜粉土質，地表下約 18 公尺處以下大多為粉土質砂或砂質粉土，並偶夾貝屑；明廉國小(HWA011)之強震測站鑽探資料指出，地表到地表下 1 公尺大多為人工回填土，而地表下 1 公尺處以下則大多為灰色粉土質砂或砂質粉土，並偶夾礫石；明恥國小(HWA012)之鑽探資料指出，地表到地表下約 2 公尺處大多為回填土，地表下 2 公尺到 32 公尺處大多為灰色至黃棕色之礫石或卵礫石，並偶夾粗中顆粒砂，此一地層中在深度約 15 公尺處夾一薄粉土層，地表下 32 公尺處到 35 公尺處為粉土質砂，並偶夾礫石；忠孝國小(HWA013)部分，地表到地表下約 2 公尺處為回填土，

地表下 2 公尺到約 20 公尺處為粉土質礫石，偶夾中細砂，地表下 21 公尺處存在一粉土質細砂薄層，其下方至地表下約 35 公尺處為灰色砂質粉土層；信義國小(HWA014)部分，地表到地表下 1 公尺處為回填土，地表下 1 公尺到地表下 35 公尺處為灰色砂礫石層與黏土質粉土層之互層，每層厚度大約為 3~5 公尺，其中在地表下 27 公尺到 33 公尺處存在黑色至灰黑色粉土質細砂；花蓮氣象站附近(HWA019)，地表到地表下 1 公尺處為回填土，地表下 1 公尺到 7 公尺處為黃棕色粉土質砂，地表下 7 公尺到 35 公尺處則為黃棕色到灰棕色砂礫石層；嘉里國小(HWA028)部分，地表到地表下約 6 公尺處為黃棕色粉土質砂，地表下 6 公尺到 19 公尺處為棕灰色粗礫石層，偶夾細砂，地表下 19 公尺到 35 公尺處則大多為灰色黏土質粉土或粉土質黏土，並偶夾細砂；花蓮港務局(HWA062)部分，表土層為黃棕色粉土質砂，並帶有少量礫石，地表下 1 公尺到 35 公尺處，大多為棕灰色砂礫石層，並夾粗中砂。

總合上述之各鑽孔之地層分佈狀況，可以得知大多數鑽孔之表土層為人工回填土，其深度大約在地表下 1 公尺處，而其下方大多為砂礫石，並偶而夾雜粉土層及中粗砂層。各鑽孔之標準貫入值隨深度分佈狀況顯示其土層緊密程度為中等緊密到非常緊密之狀態，其隨深度之變化如圖 3.1.23 所示。另外，由於大多數之標準貫入試驗值超過 50 下，因此若進行統計分析可發現超過 50 下之頻率會比其他貫入值大得多，因此對於當地地層之標準貫入試驗值未進行相關之統計分析。

此外，由於鑽探資料內亦有 P 波波速(Vp)與 S 波波速(Vs)隨深度之變化，因此本計畫亦利用彈性解公式求得給定體波波速下之楊氏模數、波松比及剪力模數隨深度之變化。所使用之公式如下：

$$V_p / V_s = \sqrt{2(1-\mu)/(1-2\mu)} \qquad \text{(Eq.3.1.1)}$$

$$V_s = \sqrt{G/\rho} = \sqrt{E/2(1+\mu)\rho} \qquad \text{(Eq.3.1.2)}$$

上述公式中由於土體之密度未知，需要假設一合理之數值以供其他物理量之計算，但由於土壤之密度變化範圍並不大，因此計算上假設其值為 2.0g/cm^3。經上式彈性解搭配體波波速所得到之彈性模數以及波松比隨深度變化如圖 3.1.24 及圖 3.1.25 所示。

由圖 3.1.24 可以得知其彈性模數之分佈範圍大約在 200 到 1500MPa 之間，而波松比大約在 0.47 到 0.49 之間。而由前人研究中所蒐集的彈性模數分佈範圍看來，本處地層大多屬砂礫石層或砂層，因此其常見之彈性模數分佈約略在 10 到 200MPa，顯見利用彈性解直接求取彈性模數可能會使得數值分析模型之輸入模數偏高，而波松比之值尚屬合理之範圍。對照上述之偏高之彈性模數值，本研究亦利用先前所使用的經驗公式(如下式)以利用標準貫入試驗值推估摩擦角與彈性模數，因此可得彈性模數以及摩擦角之分佈情形如圖 3.1.26 及圖 3.1.27 所示。

砂性土壤經驗公式：

$$E = 920(N)^{0.66}\ (\text{kPa}) \qquad \text{(Eq.3.1.3)}$$

$$\tan\phi \approx [\frac{N}{(12.2 + 20.3\frac{\sigma_{v0}'}{p_a})}]^{0.34} \quad \text{(以地表下 2.5 公尺計算有效應力)} \qquad \text{(Eq.3.1.4)}$$

黏性土壤經驗公式：

$$E = 1955(N)^{0.63}\ (\text{kPa}) \qquad \text{(Eq.3.1.5)}$$

$$S_u = 29.4(N)^{0.72}\ \ (\text{kPa}) \qquad \text{(Eq.3.1.6)}$$

此外，由鑽孔與斷層相對位置分佈圖(圖 3.1.22)亦可以得知，鑽孔編號 HWA028 與 HWA019 距離斷層線均在 400 公尺以內，其中 HWA028 更距離斷層線約 100 公尺，經檢視以上各別鑽孔之地層分佈情形，可以發現其地層分佈在地表到地表下約 19 公尺處相當類似，大多為黃棕色粉土質砂及黃棕色到灰棕色砂礫石，而就 HWA019 (花蓮氣象站)之地層分佈而言，地表下 19 公尺到 35 公尺處之地層分佈同樣偏向砂礫石層，而 HWA028(嘉里國小)在地表下 19 公尺到 35 公尺處則明顯不同，主要為極為堅硬之灰色黏土質粉土或粉土質黏土。綜合上述，建議將米崙斷層之土層分佈分為兩區，第一區所在位置主要穿過花蓮市區，在米崙斷層線之南段，其土層簡化建議分層如表 3.1.3 所示。

由於米崙斷層北段僅有 HWA028 之鑽孔資料，而其 20 公尺以下又存在一黏土層，為其他鑽孔所沒有見到的地層，因此，建議米崙斷層北段(機場附近)之簡化土層分佈

為表 3.1.4 所示，其中黏土層凝聚力部分乃利用上述之經驗公式推估而得。

表 3.1.2 米崙斷層附近工程鑽孔列表

鑽孔編號	鑽孔深度(M)	孔口標高(M)	鄰近地標
HWA008	35.45	15	花蓮商職
HWA010	35.45	14	明義國小
HWA011	35.45	21	明廉國小
HWA012	35	28	明恥國小
HWA013	35	17	忠孝國小
HWA014	35	5.86	信義國小
HWA019	35.26	15	花蓮氣象站
HWA028	35	15	嘉里國小
HWA062	35	20	花蓮港務局

表 3.1.3 米崙斷層南段(市區部分)建議簡化土層分層

深度(公尺)	SPT-N	土層性質簡述	摩擦角(度)	Young's Modulus (MPa)	Poisson Ratio
0~5	5~20	粉土質粗中細砂;夾少量粗細礫石	32	3.0	0.47
5~10	16~40	粗細礫石層;夾大量礫石質砂; 中等緊密到非常緊密	36	6.0	0.47
10 以下	40~>50	卵礫石層;夾大量粉土質中細砂以及夾灰黑色黏土質粉土; 非常緊密	40	13	0.45

表 3.1.4 米崙斷層北段(機場附近)建議簡化土層分層

深度(公尺)	SPT-N	土層性質簡述	摩擦角(度)	凝聚力(kPa)	Young's Modulus (MPa)	Poisson Ratio
0~7	2-27	黃棕色粉土質砂偶夾細礫石，較為鬆散	32	0	3	0.43
7~20	>50	棕灰色到灰色粗細礫石夾細砂	42	0	12	0.48
20 以下	>50	灰色粉土質黏土及黏土質粉土，偶夾礫石	0	400	20	0.48

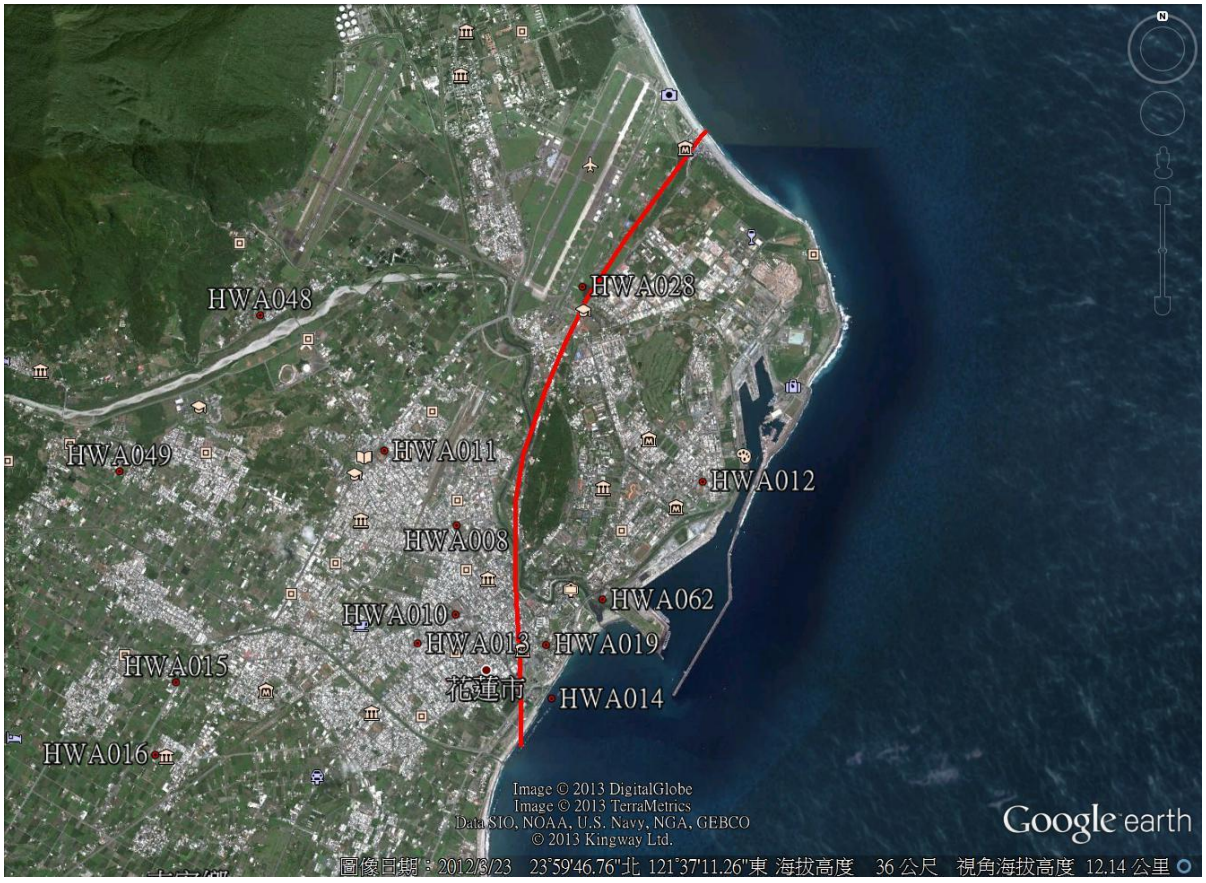


圖 3.1.22 米崙斷層線以及臨近工程鑽孔相對位置圖

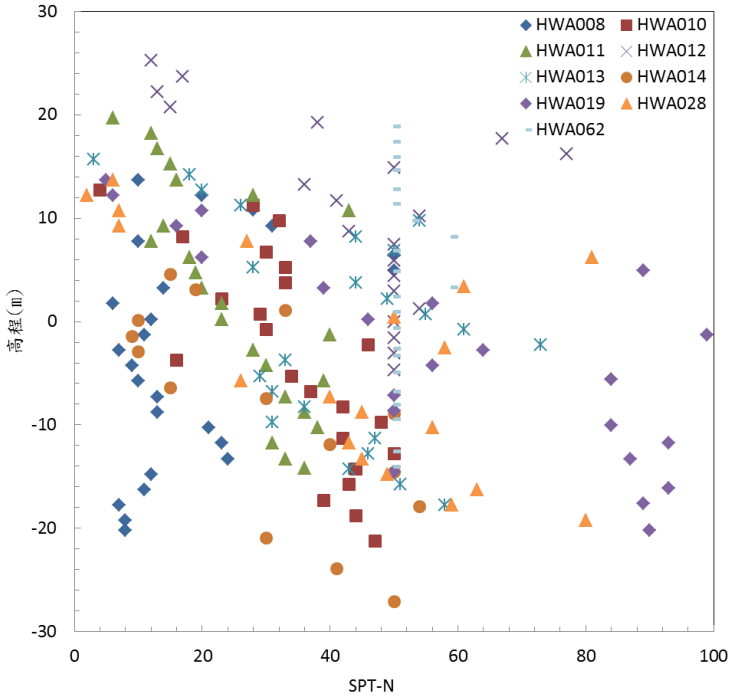


圖 3.1.23 米崙斷層臨近工程鑽孔標準貫入值與高程關係

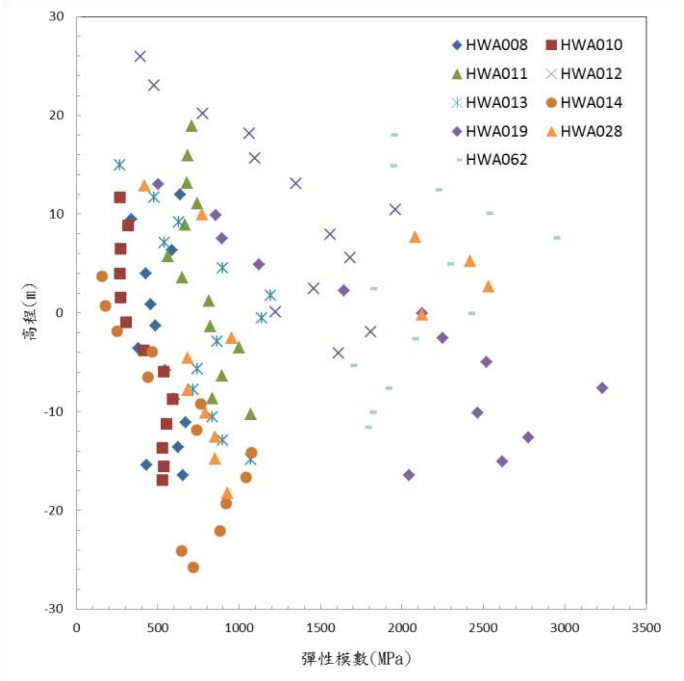


圖 3.1.24 以彈性解推估現地彈性模數隨高程關係圖

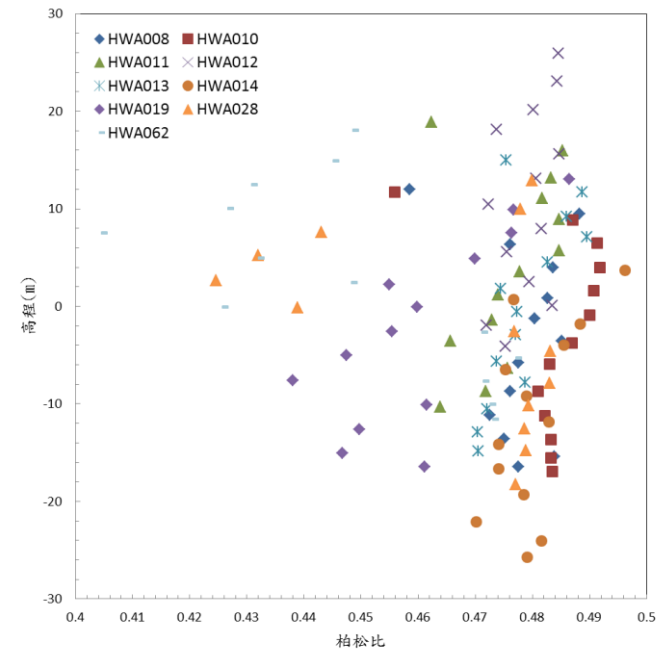


圖 3.1.25 以彈性解推估現地波松比隨高程關係圖

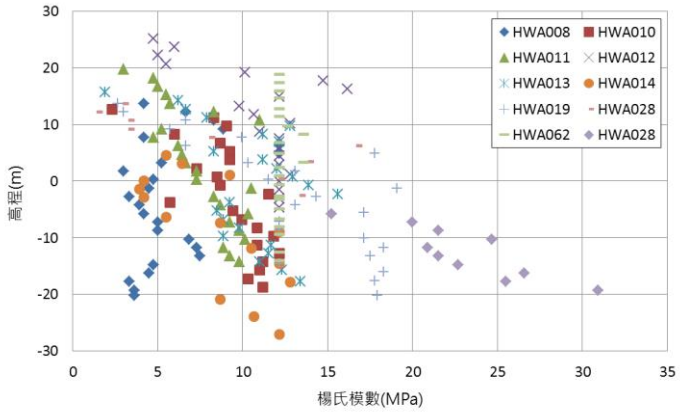


圖 3.1.26 以經驗公式推估現地楊氏模數隨高程關係圖

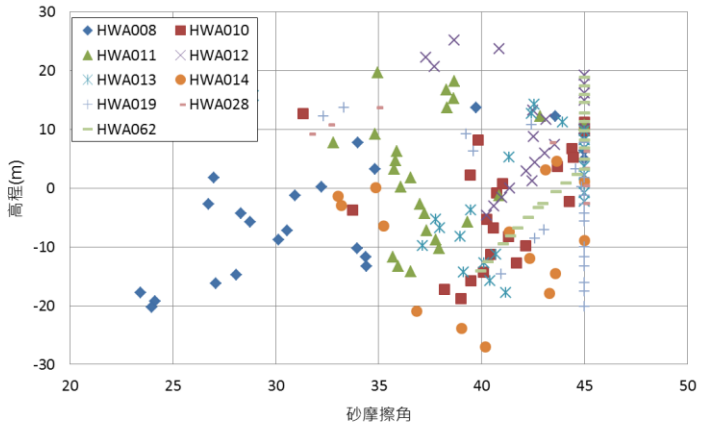


圖 3.1.27 以經驗公式推估現地摩擦角隨高程關係圖

3.1.1.4 新化斷層槽溝開挖與地表破裂跡

1946年12月5日台南地區發生芮氏規模6.3的地震，新化斷層為此次的造震斷層，是一右移為主約呈東北東走向的橫移斷層，由台南縣新化區那拔里向西延伸至北勢里(圖 3.1.28)，長度約 6 公里(張麗旭等，1947)。以造震斷層稱之，乃根據地形上的特徵，認為此斷層應存在已久。

新化斷層位於新化丘陵西緣，出露的地層包括六雙層、階地堆積層與沖積層(圖 3.1.29)。六雙層下段為棕黃色砂岩和厚層泥岩，上段以棕黃色砂岩為主，在新化圖幅中又稱為崎頂層。階地堆積層，以礫石、砂與泥為主；沖積層，也以礫石、砂與泥為主(林啟文等，2007)，斷層地表跡兩側地層相同。在地形上，那菝林至深坑橋有明顯線形，疑似為斷層線谷，坑子溪的流路在深坑橋東方由北北西轉向西南西，呈現約直角轉彎，至深坑橋西側又轉向西北流研判為斷層錯移造成的河流改道(林啟文等，2007)。林啟文等(2007)由比例尺五千分之一像片基本圖的等高線分析，在多處地點斷層兩側均顯現偏移現象，與航照上所發現的線形一致，偏移量約為 50~80 公尺，偏移現象指示為右移，研判則現今所觀察到的地形特徵，可能是多次斷層活動累積的結果。

根據張麗旭等(1947)的報導，1946 年的台南地震造成 74 人死亡，重傷 200 名，輕傷 274 名；民房全毀者達 1971 間，半倒者計 1696 間，引致的地變現象，以新化造震斷層最顯著，其延伸情形如前述，另外尚有地裂(fissure)、撓曲(flexure)及噴砂等現象發生。變位情形隨地不一，但一般言之，西北側上昇而向東北推移，東南側則反之。圖 3.1.30 中的兩照片為，此事件中變位量最大的兩處，位置點見圖 3.1.28。照片(a)的水平變位達 182 公分，垂直變位為 67 公分，裂口最寬處為 140 公分；圖(b)水平變位達 2 公尺，垂直變位 76 公分，為此斷層之最大變位處。

陳文山等(2006)從地表地質與地形特性，認為新化斷層南側為受到台南斷層向西逆衝，所產生褶皺的台南台地，而褶皺逆衝帶北側則以新化斷層為界；斷層北側地塊尚屬於褶皺逆衝帶前緣沉降的前陸盆地，至今還未隆起，每年約沉降 11-5 公厘(陳文山等，2004a)。陳文山等(2004a)亦認為此地區第三紀至第四紀時發育許多北東東-南西西走向的正斷層，新化斷層南側屬於地壘的目前，基盤較淺，斷層北側屬於沉降較大

的地塹目前。第四紀晚期受擠壓時，可能基於早期發育的正斷層以及基盤的型態，而在新化斷層兩側各自發展成為不同的褶皺逆衝帶，並成為西南部褶皺逆衝帶中重要且活躍的撕裂斷層。

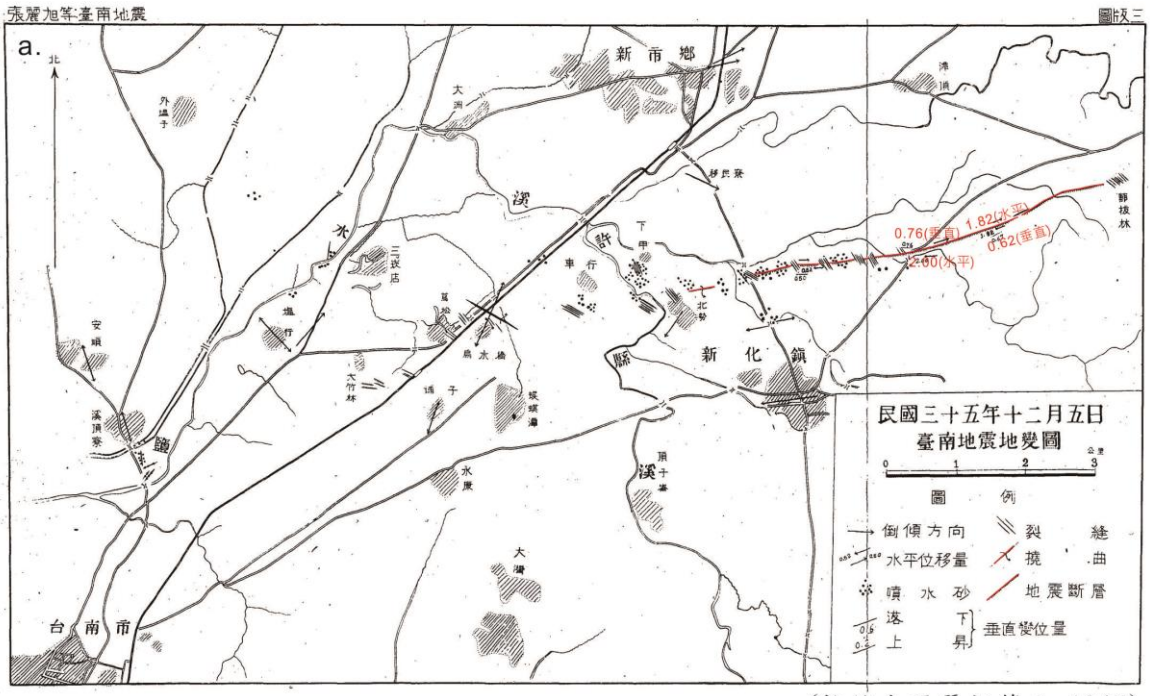
垂直新化斷層地表跡開挖的垂直剖面之槽溝有六處，分別為有李錫堤等(2000)在台南農業改良場進行的 3 處，即圖 3.1.29 中的畜產所 1、2、3 號槽溝及陳文山等(2002；2004b)在新化區的玉峰寺與第六公墓之間鞍部西側挖掘的 3 處，即圖 3.1.29 中的那拔林 1、2、3 號，另外有一道槽溝那拔林 4 號，沿著斷層地表跡開挖，其縱向橫跨那拔林 2 號及 3 號，先後清理了兩階不同深度的水平面。

根據林啟文等(2007)的報導，李錫堤等(2000)在台南農業改良場進行的 3 處槽溝開挖，出露岩層為全新世台南層泥岩夾薄層砂岩，斷裂面均呈高角度傾斜，研判屬於走向橫移斷層的花狀構造，其中一處槽溝內找到 4 層古土壤層，可能代表有 4 次古地震事件。

陳文山等(2002；2004b)於地質調查所槽溝開挖的古地震研究計畫中，對新化斷層共有前述的4條槽溝的開挖。由那菝林2號槽溝剖面(圖 3.1.31)與3號槽溝剖面(圖 3.1.32)的沉積層以及斷層的截切關係，可以區分 3 期古地震造成的斷層。第 1 期的斷層（F1）位於 3 號槽溝東剖面底部(圖 3.1.32)，研判 F1 斷層約發生在富含草本植物的 M1 泥層沈積（距今 9,095±451 年前）之後。第 2 期斷層（F2）在 2 號與 3 號槽溝中均有出露，F2 斷層是由一系列兼具正移斷層的構造，構成半地塹的型態，主斷層出現在 3 號槽溝東剖面的北側，垂直落差約 1.6 公尺，其餘正移斷層的垂直移距約十數公分至十數十公分，從 S 砂層的變形顯示主斷層為一向南傾斜的斷層；F2 斷層截切 M3 泥質粉砂層，因此古地震事件發生在 M3 層沈積（距今 1,777±87 年）之後，並在河道沈積（距今 1,342±58 年前）之前。第 3 期的斷層（F3）截穿整個剖面，在 3 號槽溝截穿河道沉積層，被回填土覆蓋；那菝林 1 號與 2 號槽溝東剖面截切蔦松文化（距今約 400~2,000 年）的堆積層，亦被回填土覆蓋。從槽溝剖面中斷層與沉積層的關係，雖無法判斷此斷層活動的時間，但從 1 號槽溝斷層切穿至地表，以及 1946 年地震斷層亦通過此位置(張麗旭等，1947)，顯示 F3 斷層可能為 1946 年產生的地震斷層。F1 與 F2 斷層的型

態都具有正移斷層性質，而 F3 斷層兩側的岩層不具明顯的錯移量，斷層型態則是由數條斷層從槽溝底部向上展開(圖 2.1.3)，此種開花狀構造（flower structure）常出現在斷面垂直的平移斷層、且具壓縮性的構造(Lindvall et al., 1989)。那拔林 4 號為沿著斷層線開挖兩個水平面的槽溝，目的為觀察沿斷層走向的變形。從水平剖面來看 F3 斷層發現斷層剪切帶呈雁行排列(en echelon)，每一斷層的長度僅數公尺長，呈右移作用，斷層的錯距約僅數十公分至數公分，斷層走向約 NE75-90°(圖 3.1.33)。水平剖面中除了呈現具右移的斷層之外，還呈現一組與 F3 斷層呈 36-42°夾角的雁行拉張裂隙，走向約 NW64-70°。此裂隙構造僅發育在泥質沉積層中，它是槽溝開挖之後才發展出來的結構，陳文山等(2004b)認為此裂隙可能顯示現今斷層帶的應變特性。

根據地質調查所的野外調查(林啟文等，2007)，並未發現新化斷層的露頭，然而在新化畜產試驗所內發現疑似斷層通過位置的路面，有 2 組雁行排列的裂隙，如圖 3.1.34(a)，其中一組的走向為 N80°W，另一組走向為 N60°E。柏油路上也有數處突起，如圖 3.1.34(b)，路旁水溝壁、建築物外牆柱腳亦有多處破裂，如圖 3.1.34(c)&(d)；建物大門口及後方走廊地面可見 2 組裂隙群，一組走向為 N70o~80°W，部份破裂有垂直方向的變位量，南側為升側，另一組走向約 N0°~25°E；該所將這些破裂組走向進行繪製，如圖 3.1.34(e)，指出可見 3 組主要的破裂，並透過與理想中右移斷層系統中產生的破裂作比較，加上試驗所內的水池、柏油路面裂縫及建築物破裂群約略呈線狀條帶分布，與當時(張麗旭等，1947)所述斷層通過位置大致相符，進而推測這些破裂與新化斷層活動的相關性頗高(林啟文等，2007)。



（摘錄自張麗旭等人, 1947）



（底圖引自google map）

圖 3.1.28 1946 年台南地震的地表破裂。(a)張麗旭等人(1947)報導之地表破裂圖。(b)1946 台南地震地表破裂於現今行政地圖之位置。

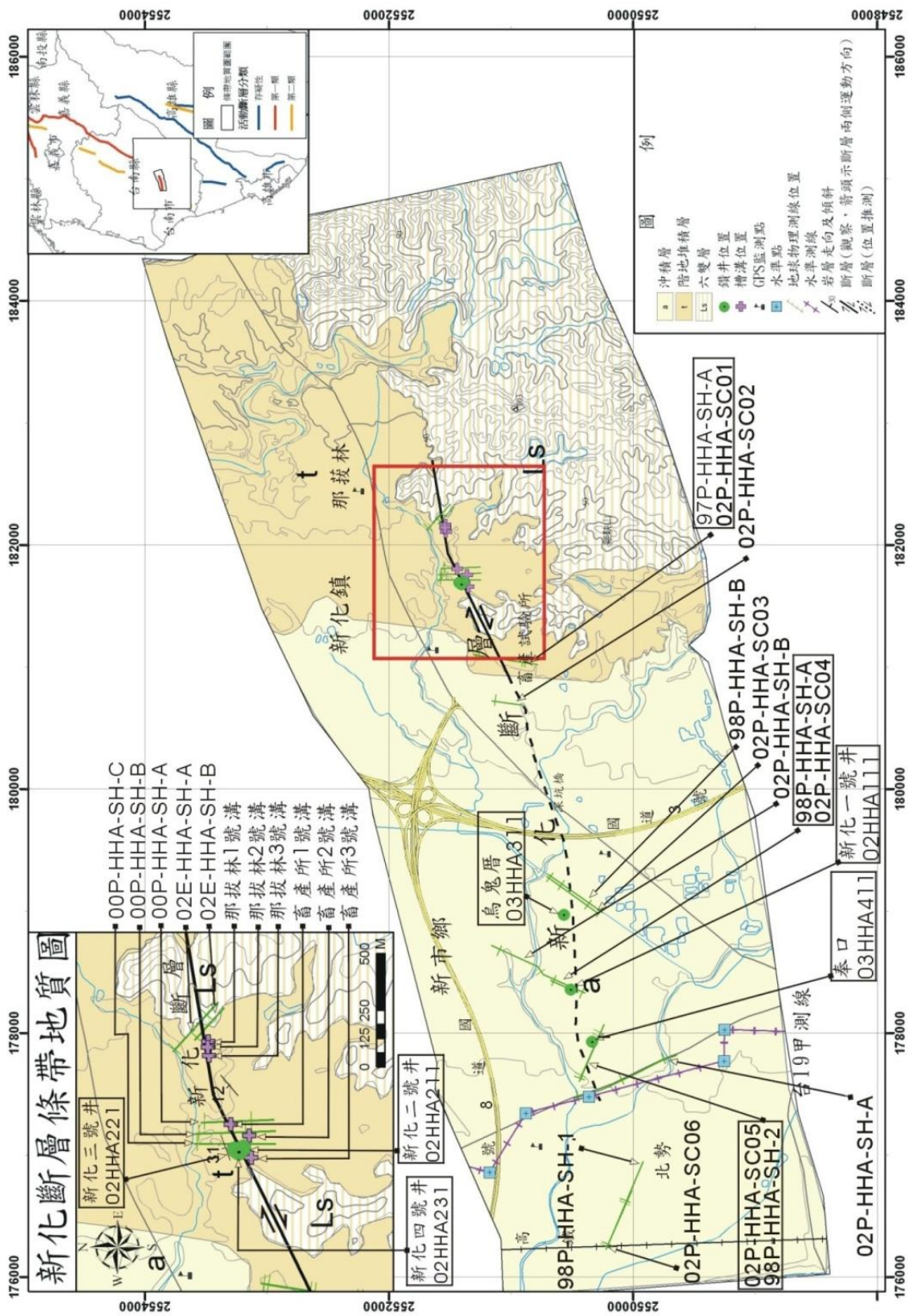


圖 3.1.29 新化斷層條帶地質圖。(林啟文等，2007)

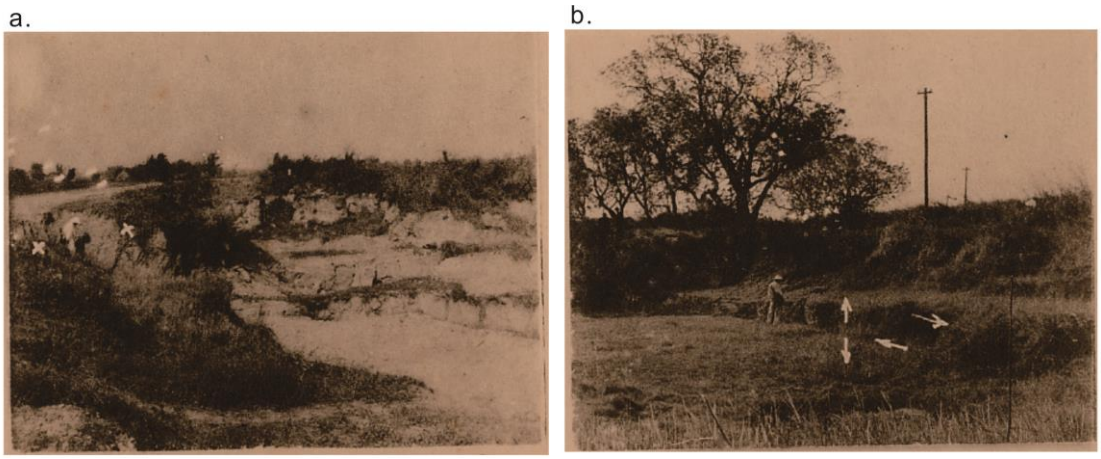


圖 3.1.30 1946 年台南地震於新化地區的地表變形(位置標示於圖 3.1.27.a)。(a)於舊新化種馬牧場內，水平變位達 182 公分，垂直變位為 67 公分，裂口最寬處為 140 公分。圖中兩 x 號原先相接。(b)新化東北約 2 公里處，水平變位達 2 公尺，垂直變位 76 公分。(張麗旭等，1947)

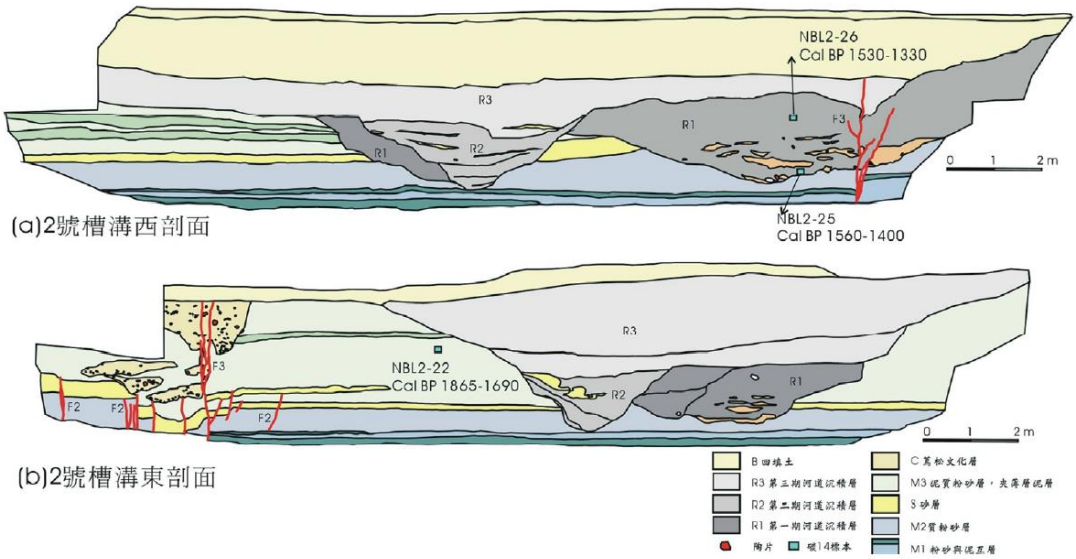


圖 3.1.31 那拔林 2 號槽溝。(陳文山等，2004b)

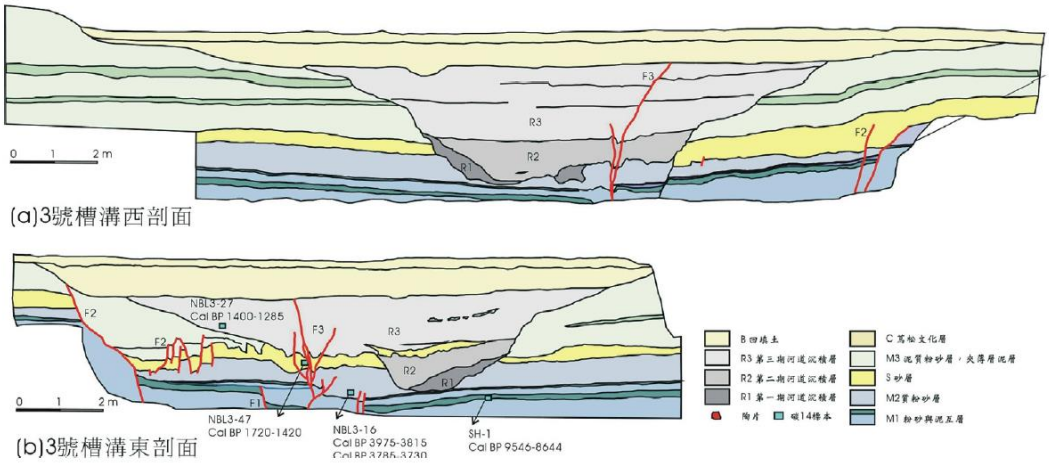


圖 3.1.32 那拔林 3 號槽溝。(陳文山等，2004)

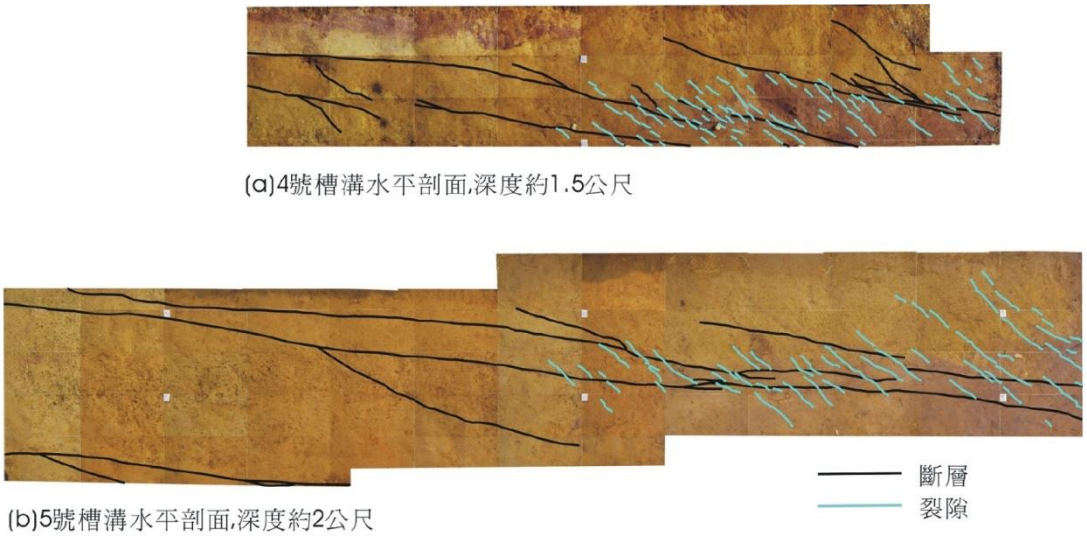


圖 3.1.33 那拔林 4 號槽溝。(陳文山等，2004b)

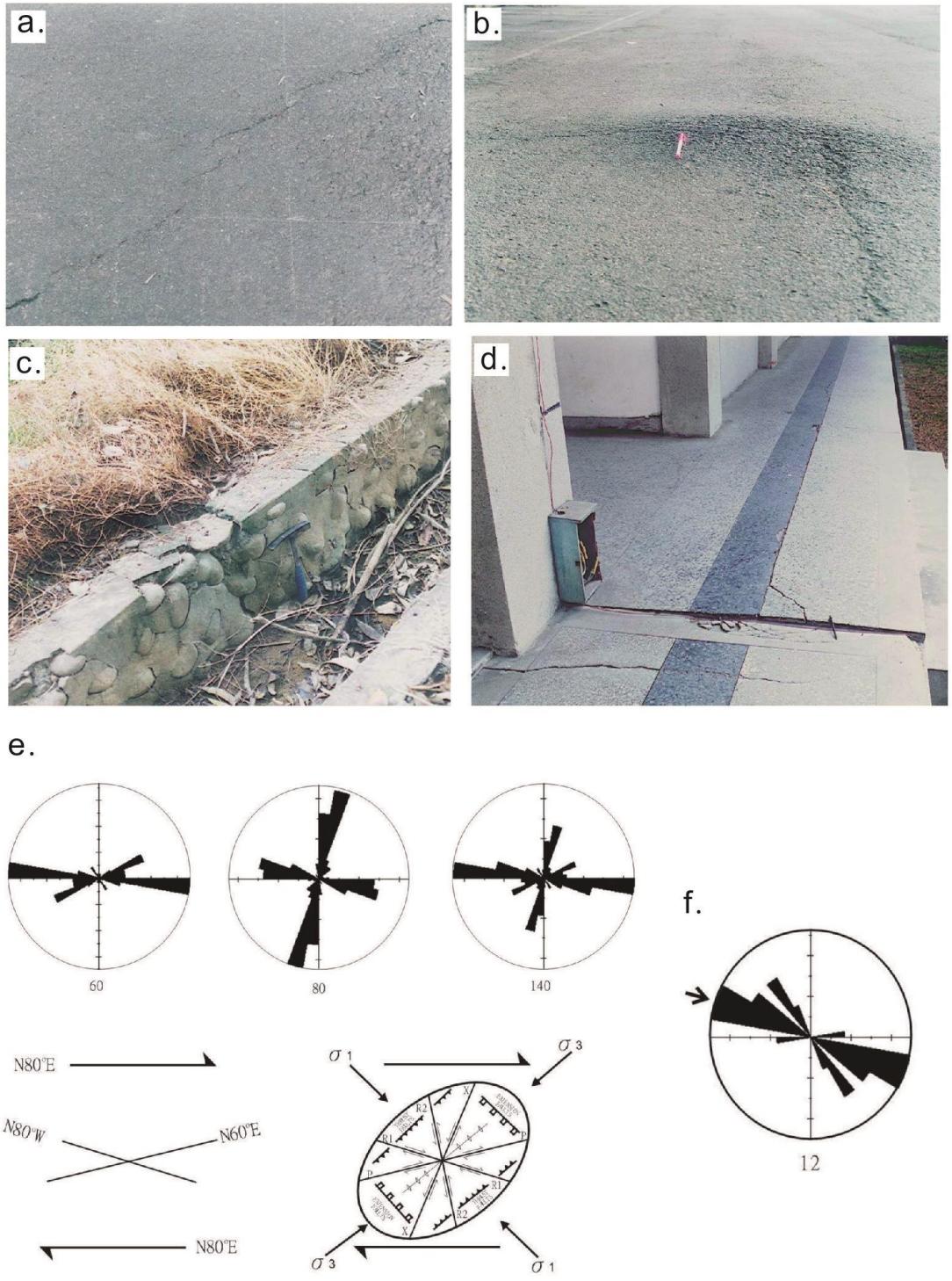


圖 3.1.34 新化斷層畜產試驗所內的地面破裂。(a)畜產試驗所柏油路面上兩組雁行排列之裂縫群。(b)畜產試驗所柏油路面上的突起。(c) 駁坎上的破裂。(d)建築物地面的裂縫群。(e)裂縫群的走向與橫移系統應變橢圓的對照。(f)1946 年地震後新化斷層沿線裂縫方向的統計圖。(林啟文等，2007)

3.1.2 國外橫移斷層案例(黑沃斷層)

3.1.2.1 黑沃斷層之位置與歷史地震

黑沃斷層(Hayward Fault)長約 119 公里，分佈在加州人口密集的舊金山港灣區，為該區具重大威脅性的斷層之一，如圖 3.1.35。斷層南段最近一次錯動，引致的 1868 年的地震，北段的潛移特性造成加州伯克萊大學(UC Berkeley)大學中的建物的破壞，也因為該名校之故，格外引人重視。黑沃斷層為聖安地列斯斷層系統(San Andreas fault system)的成員之一，其相對位置，見圖 3.1.36，該斷層系統調節太平洋板塊與北美洲板塊的相對位移，其中以聖安地列斯斷層為主要的斷層，但其他的系統中的成員也同時扮演重要的角色，且屬災難型的活動斷層，黑沃斷層即是其一。

根據 Graymer R. W. et al(2005)，黑沃斷層其實為一寬約 1~5 公里的斷層帶中現今活躍的部份。這條斷層帶分隔了舊金山港灣平原下由由異地形成的 Franciscan 雜岩(晚侏羅紀至白堊紀)及港灣東邊丘陵地下方由準原地形成的 Coast Range 蛇綠岩系(中至晚侏羅紀)及 Great Valley Sequence 的沉積岩(侏羅紀至白堊紀)，見圖 3.1.37。這斷層帶從 12Ma 前以來，累積了~100 公里的右移錯動量(SAF 從 15~20Ma 累積了 560 公里)。根據 Lienkaemper J. J. et al(2001, 2012)的報導，第四紀以來的滑動速率為~9mm/yr ，約為加洲兩板塊平均相對滑動速率(約 33~37 mm/yr)的四分之一，斷層淺部幾乎全長皆有潛移的現象，約~3.5-6mm/yr，造成知名學府加州伯克萊大學(UC Berkeley)校園內許多人造建物的損壞，如圖 3.1.38 即為該斷層通過該校體育場的位置及破壞情形。

從黑沃斷層古地震的研究得知，最近一次沿斷層錯動的地震事件為 1868 年，規模約 6.8。目前我們收集到古地震槽溝開挖場址有兩處，分別為泰森潟湖(Tyson's Lagoon)及 Mira Vista，其位置點見圖 3.1.39，在 Mira Vista 有兩個開挖槽溝，槽溝中主要以約 6000 年以來的池塘沉積物為主，與兩側風化的蛇紋岩則以斷層或不整合相接處，其中有數道的近乎垂直的斷層，斷層上端的沉積物仍有數十公分厚(Lienkaemper, J. J. et al., 1999)，圖 3.1.40(a)為其一之槽溝；在泰森潟湖開挖 20 個槽溝，辨識出 12 次的古地震，搭配定年所得資料，此斷層的地震錯動再現週期為 161±65 年(Lienkaemper et al., 2010)，主要的組成材料為潟湖沉積物，槽溝中可見近乎垂直且分岔的斷層，如圖 3.1.40(b)。

3.1.2.2 黑沃斷層區域供水系統改善計畫

依據「第 8 屆台、美、日自來水設施耐震對策研討會」暨考察舊金山自來水耐震及高地區加壓設施參訪報告(臺北自來水事業處，2013)指出，舊金山公共設施委員會**(San Francisco Public Utilities Commission, SFPUC)**所轄的 Hetch Hetchy Regional Water System，提供舊金山灣區 250 萬人口每日約 100 萬噸的飲水需求。這個供水系統興建迄今已經接近百年，不僅提供區域內民眾充足、安全且衛生的飲水，也是區域內經濟活動能穩定發展的重要因素。

Hetch Hetchy Regional Water System 的水源是來自 Yosemite National Park 的融雪，先在 Hetch Hetchy Reservoir 儲集後，再經由 167 英哩的輸水管線，配送到舊金山灣區的供水區域內（如圖 3.1.41）。

此供水系統雖然已持續穩定運作接近百年，但系統卻經過美國三大活動斷層：San Andreas, Hayward,和 Calaveras 斷層。美國地質調查所在 2008 年發布的分析認為，在未來 30 年內，這三條活動斷層會引致大規模地震的機率達到 63% (2007 Working Group on California Earthquake Probabilities, 2008)。因此 SFPUC 在 2002 年起即著手擬訂供水系統改善計畫 (Water System Improvement Program, WSIP)，希望灣區的供水系統在改善後，於遭遇大地震事件時，仍能在 24 小時內恢復基本穩定的供給。WSIP 計畫包含 81 個子計畫，執行地區跨越 7 個郡，整個計畫費用達到 46 億美元，改善內容涵蓋一座新的淨水場；改善輸水設施包含輸水管、輸水隧道、加壓站；也包含改善貯水設施如水壩、水庫、配水池等設施。

計畫希望能達到 4 個可靠度目標：耐震的可靠度、運送的可靠度、供應的可靠度、及水質的可靠度。這個改善計畫也是美國境內近年最大的供水改善計畫之一。

在 WSIP 計畫內，被認為風險度最高的部分，有一項就是 Bay Division Pipelines 編號 3 和 4 (BDPL 3 and 4)的輸水管，這兩條輸水管在 Fremont 地區的州際公路附近通過 Hayward 斷層（如圖 3.1.42）。

Hayward 斷層長約 119 公里，分佈在加州人口密集的舊金山灣區，為該區具重大威脅性的斷層之一。斷層南段最近一次錯動，引致了 1868 年的地震，北段的潛移特性

造成加州伯克萊大學(UC Berkeley)大學中的建物的破壞（如圖 3.1.38）。Hayward 斷層為聖安地列斯斷層系統(San Andreas fault system)的成員之一，該斷層系統調節太平洋板塊與北美洲板塊的相對位移，其中以聖安地列斯斷層為主要的斷層，但其他的系統中的成員也同時扮演重要的角色，均屬於災難型的活動斷層。

由 Hayward 斷層的歷史地震紀錄及地震危害度的分析指出，此斷層再次錯動並引發地震是不可避免的，經過分析，BDPLs 以回歸期 975 年的地震最大地表加速度 1.05g，水平位移 6.5 英呎作為設計基準，輸水管與斷層的交角在 TraceA、B、C 處約為 45-50 度，相關的設計區域參數如表 3.1.5。

由 BDPLs 調查得知該斷層每年平均位移量達 6mm，主要可能之地層破裂帶寬約 23m，第二可能之裂損之區域則約達 60m，為確保耐震性及供水不中斷之目的，SFPUC 於穿越此斷層之設計，採七段可滑動式混凝土箱涵包覆於輸水管外（圖 3.1.43），這樣的設計方式，也在國家科學基金會(National Science Foundation, NSF)的資助下在康乃爾大學的地震工程研究中心，進行了縮尺 1/10 的大型室內試驗來驗證其可行性（圖 3.1.44）。

另外為因應可能產生的變位，BDPLs 也採用特殊的 Ball Joint 及 Slip Joint 等耐震管件設施，其中 Ball Joint 兩側各可承受 12 度的撓曲變形，並在製造工廠前內進行測試（圖 3.1.45、圖 3.1.46）；而特製的 Slip Joint 可以承受 9 英呎的壓縮變位和 1 英呎的拉伸變位（圖 3.1.47）。BDPL3 號管線和 BDPL4 號管線在 Trace B 處的設計平面圖如圖 3.1.48 及圖 3.1.49。

本 BDPLs 計畫在 2011 年完成規劃設計後，於 2012 年中開始動工，已完成部份可滑動式混凝土箱涵及管線按裝，至 2013 年 8 月的工程進度達到 25%，相關施工相片如圖 3.1.50。

WSIP 計畫在穿越 Hayward 斷層處的 BDPLs 設計，是採用最高的耐震標準，相關的設計及試驗，也有國家級的研究單位提供資助，期望能達成地震後 24 小時內即可恢復基本供水需求，此種重大維生管線的災損預防規劃，值得我們參考。

3.1.2.3 美國加州地質調查所活動斷層條帶圖

底下將以黑沃斷層為例，介紹美國官方版的活動斷層斷層條帶圖製作之緣由、根據、方式及目的等。黑沃斷層的斷層條帶圖可在加州政府保育部(Department of Conservation)的網站上查得，網址為 http://www.quake.ca.gov/gmaps/WH/regulatorymaps.htm，圖 3.1.51 為其查詢系統，該系統已與 google earth 整合，因此有中英對照的地名。點選標的斷層區段後，將可下載方形區塊的管理地圖(Regulatory Maps)，圖 3.1.52 即為黑沃區方形(Hayward Quadrangle) 管理地圖的例子，圖中除包含地震斷層條帶(Earthquake Fault Zones)，也整合土壤液化區帶(Liquefaction Zones)及山崩區帶(Landslide Zones)，後兩項為 1990 年「地震災害潛感區劃分法案」(Seismic Hazards Mapping Act)頒布後加入，非本計畫所關切，不加敘述。地震斷層條帶的劃定則是根據 1972 年通過的阿奎斯特-布里奧洛地震斷層區劃分法案(Alquist-Priolo Earthquake Fault Zoning Act)，目的在於減少人類使用的建物因地表斷層作用而造成的傷亡，這法案要求其州屬的地質師對活動斷層的地表跡劃設規範範圍，因此地震斷層條帶也稱活動斷層條帶，並予以發行合適的地圖供民眾參考。對規範斷層條帶的劃定目前的作法，通常在斷層地表跡位置確定後，以其兩側特定的地標如道路、溝渠的交匯處等，以直線連結當成規範斷層條帶的邊界，這些標地點亦即為作圖時的轉折點，用以將規範斷層條帶繪製在 1：24000 的等高線地形圖上。斷層條帶的寬度沒有一定的規定，平均約為四分之一公哩寬(400 公尺)，圖 3.1.53 截取自黑沃區方形管理圖(圖 3.1.52)的左上方，作為更進一步說明管理圖(Regulatory Maps)中的斷層條帶之用，其中活動斷層斷層跡的標示，因其位置的確定性，分類成出露位置為精確可知的(以實線表示)、大致上確定的(長虛線)、推測的(短虛線)與被隱敝的(點線)四類，斷層條帶的邊界則由標地物轉折點(以具圓心的圓圈標示)，以實心直線連結。至於斷層跡的位置及確定性，僅記敘彙整各方研究，並沒有詳細的說明如何建立。

活動斷層的地表跡資料的建立，為規範地震斷層條帶的根本，然而除有歷史記錄的錯動斷層外，地表斷層跡的資料之建立，確實是項大挑戰。圖 3.1.54 為以加州柏克萊大學區域為例，比較加州政府頒布的地震斷層條帶圖上的黑沃斷層斷層跡與美國地

質調查所(**http://pubs.usgs.gov/ds/2006/177/**)所建立的斷層跡的差異，大致上兩單位彙製的斷層跡一致。但明顯地，美國地質調查所將其依據的作圖證據一併標示於圖上，包括開挖槽溝及有地表潛移的證據，使其更具說服力，然有部份小段的斷層跡並未出現在加州地震斷層條帶圖中，不過皆在斷層條帶的範圍內。

表 3.1.5 BDPLs 相關設計區域參數(WLA, 2008)

Trace	Design Horizontal Displacement (feet)	Design Vertical Displacement (feet)	Width of Primary Zone (feet)	Width of Secondary Zone (feet)
Trace A	1	0.7	213	213
Trace B (main trace)	6.5	0	75	196
Trace C	0.5	0.5	33	134

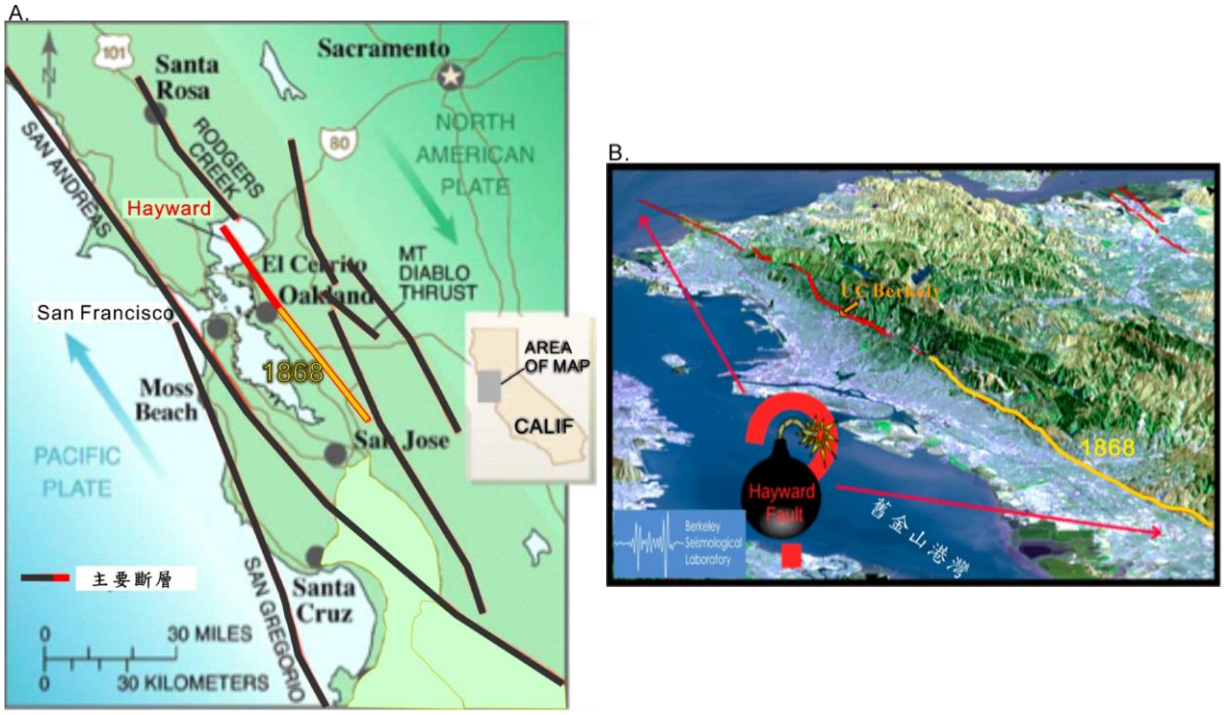


圖 3.1.35 黑沃斷層地表跡位置圖。A.1968 年地震活動的地表跡。B.斷層兩側的地形。(摘錄自：Berkeley seismological lab Outreach Presentation)

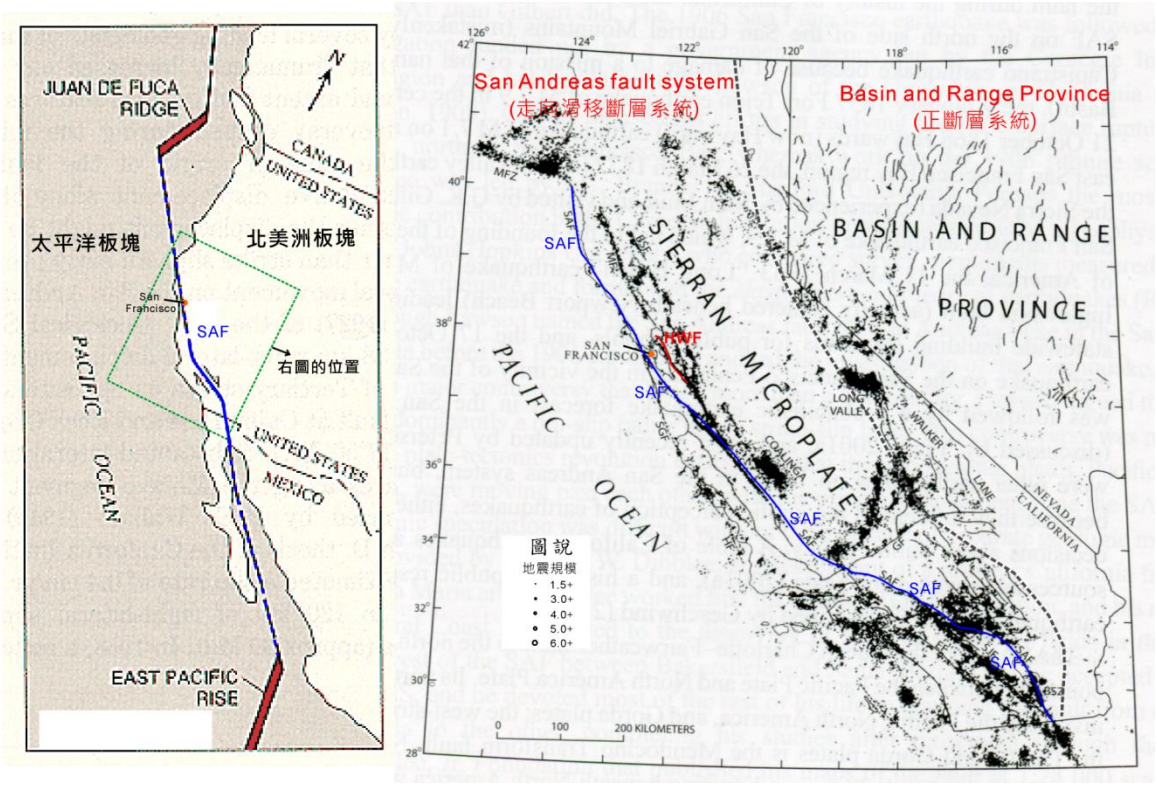


圖 3.1.36 聖安地列斯斷層系統(San Andreas fault system)與黑沃斷層。A.北美大陸西岸的大地構造，SAF：San Andreas fault。B.地震的分布與斷層位置。(Yeats, 2012)

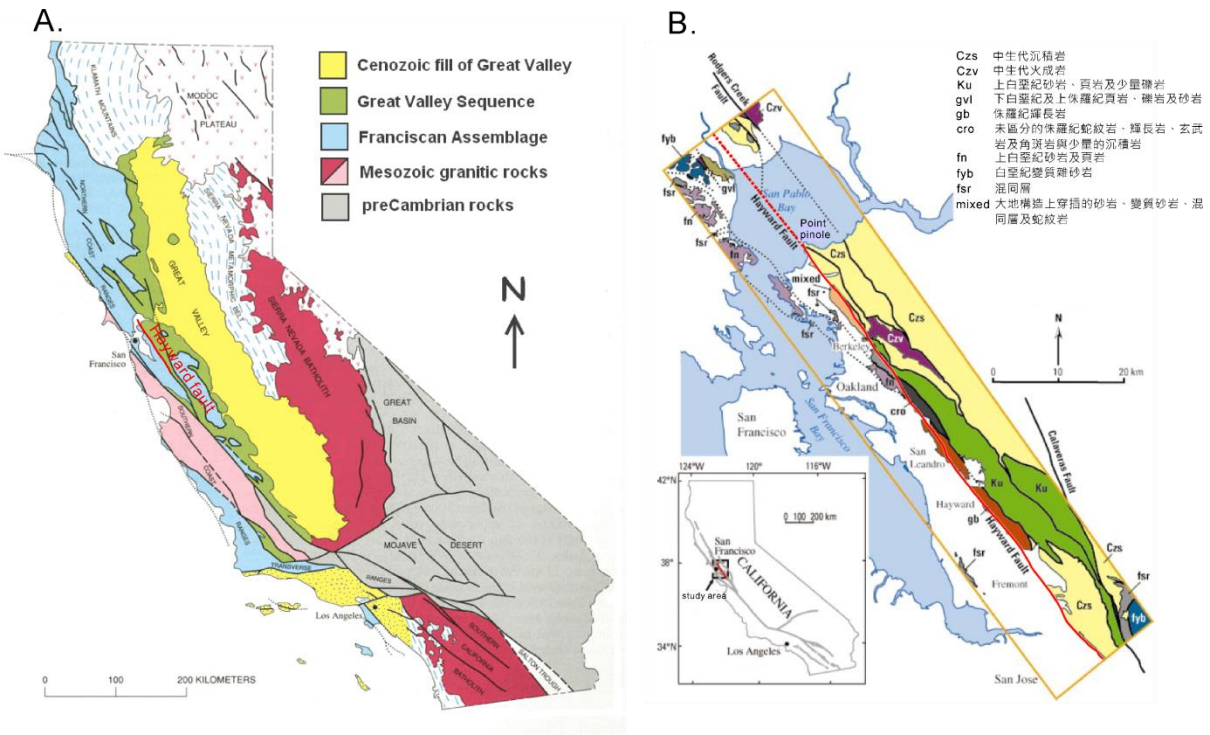


圖 3.1.37 北美大陸西岸與黑沃斷層沿線地質圖。A.北美大陸西岸的地質圖。B.黑沃斷層沿線的地質條帶圖。(Graymer et al., 2005)

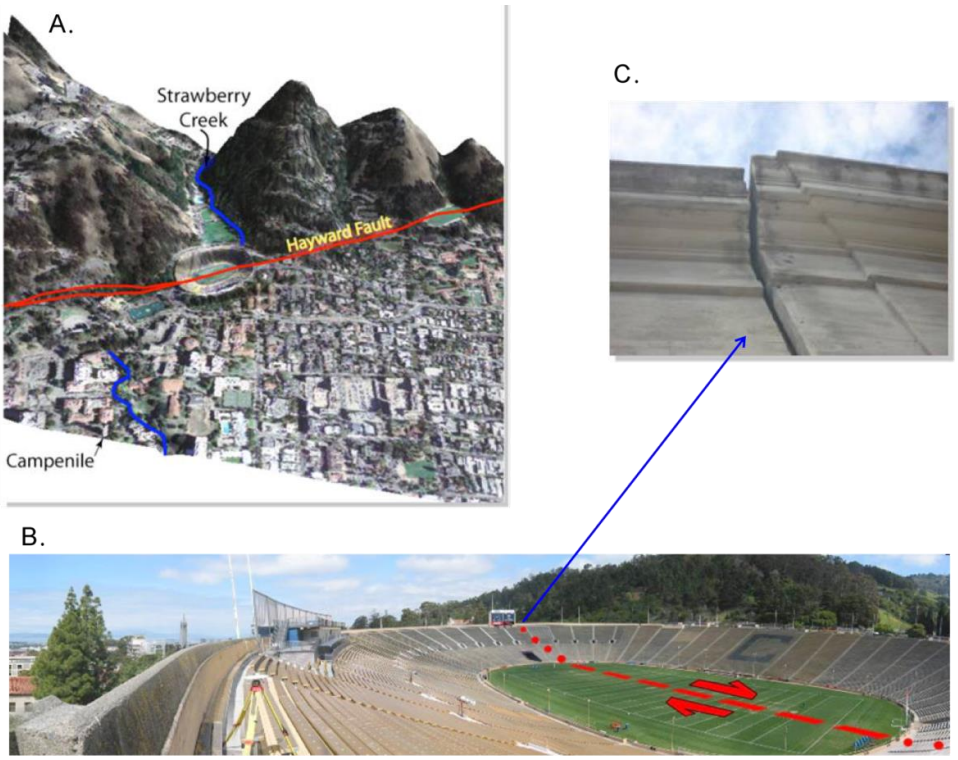


圖 3.1.38 黑沃斷層地表跡與伯克萊大學體育場。A.於加州伯克萊大學的黑沃斷層地表跡。B.伯克萊大學體育場的黑沃斷層地表跡。C.體育場的錯位情形。(摘錄自: Berkeley seismological lab Outreach Presentation)

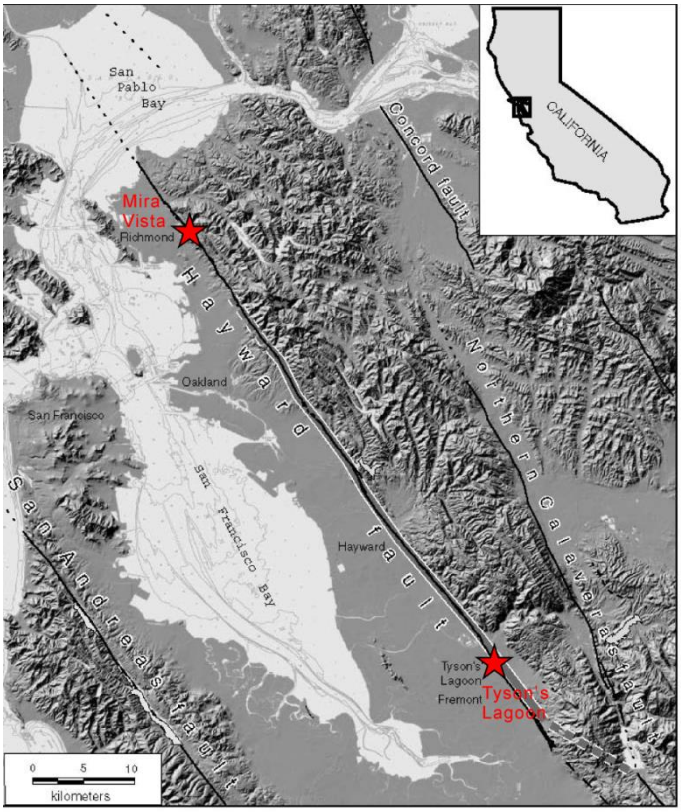
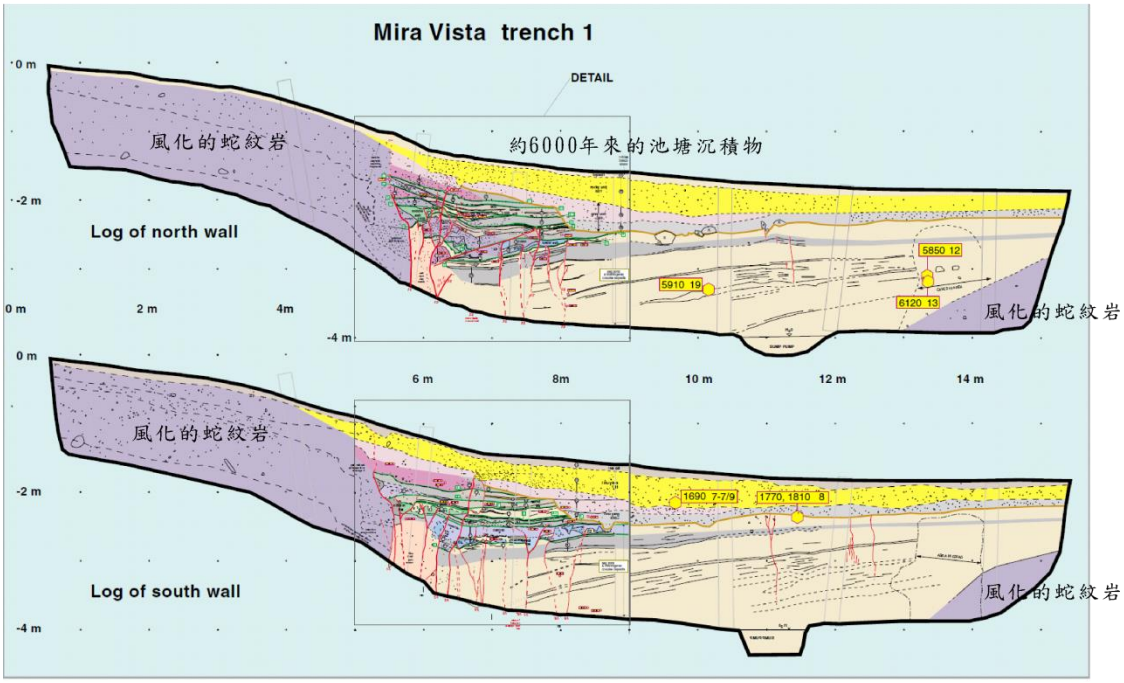


圖 3.1.39 黑沃斷層沿線槽溝開挖位置(Lienkaemper et al., 2010)

A. Mira Vista的槽溝



B. Tyson's Lagoon的槽溝

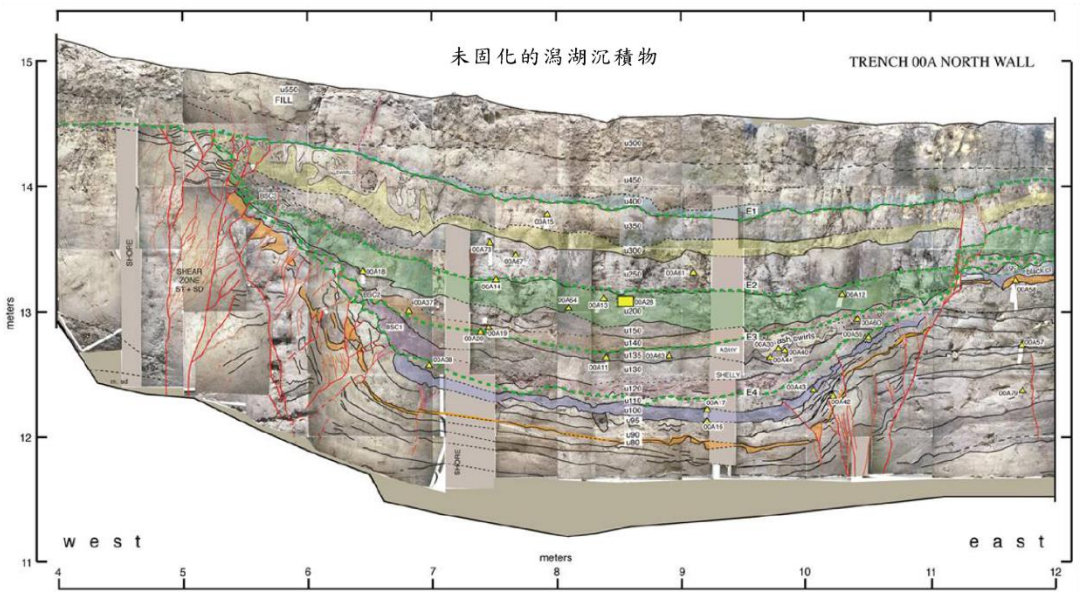


圖 3.1.40 黑沃斷層沿線開挖槽溝垂直剖面圖(圖 A 摘錄自: USGS, Open －File Report 99-318；圖 B 摘錄自:Lienkaemper et al., 2010)

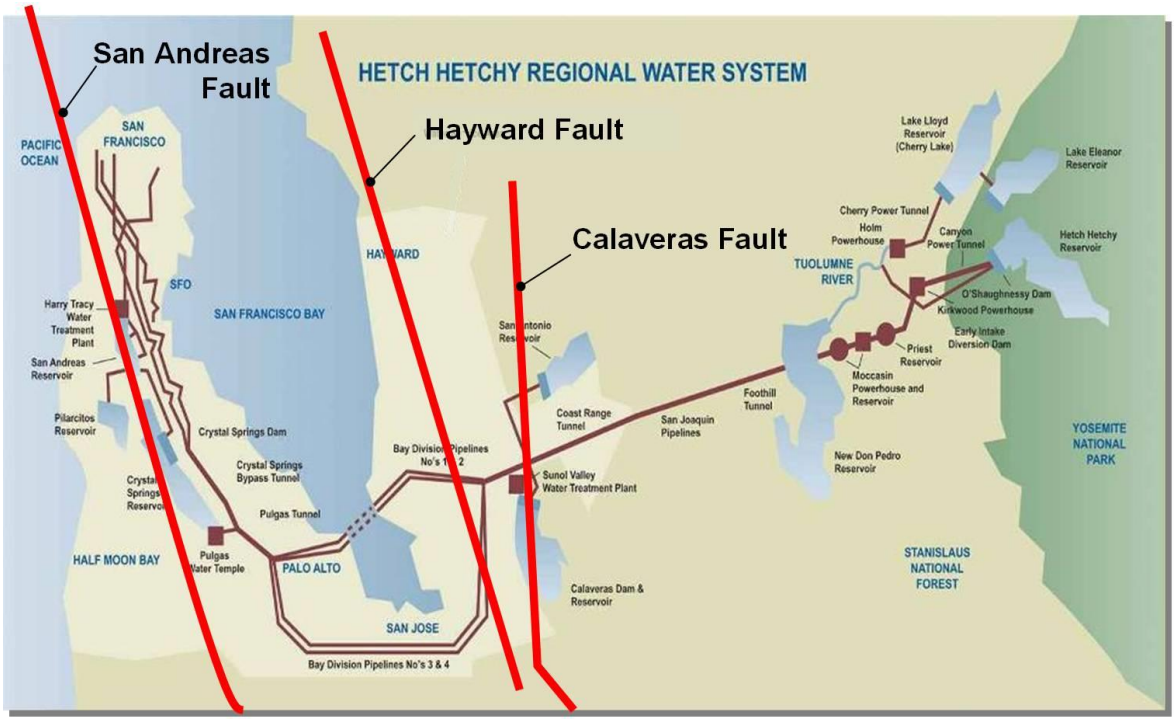


圖 3.1.41 Hetch Hetchy Regional Water System 配置圖

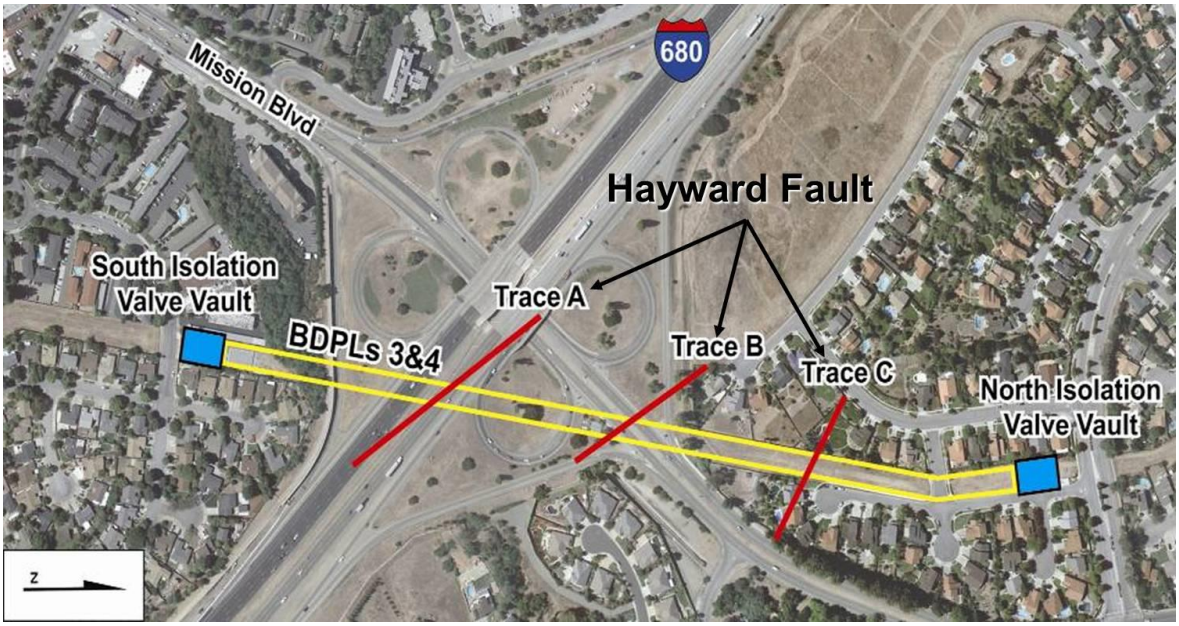
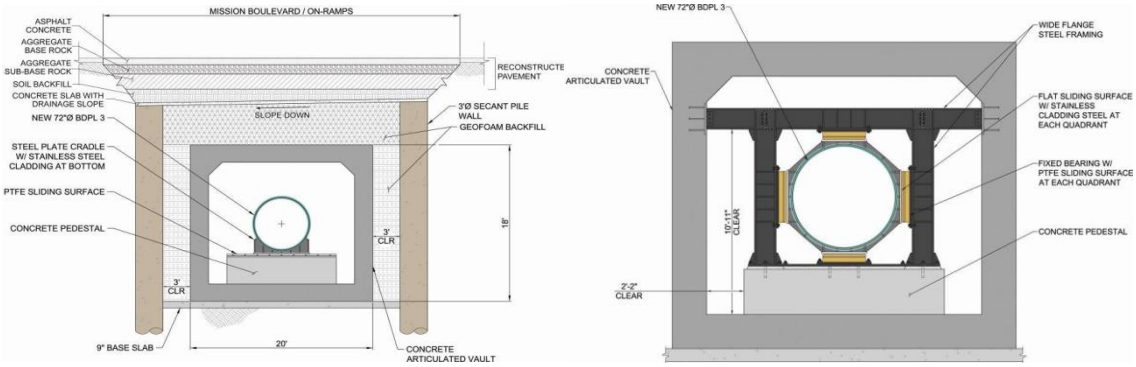


圖 3.1.42 BDPLs 位置圖



(a)BDPLs 設計斷面圖　　(b)BDPLs 支承處設計斷面圖

圖 3.1.43 包覆於輸水管之可滑動式混凝土箱涵設計圖

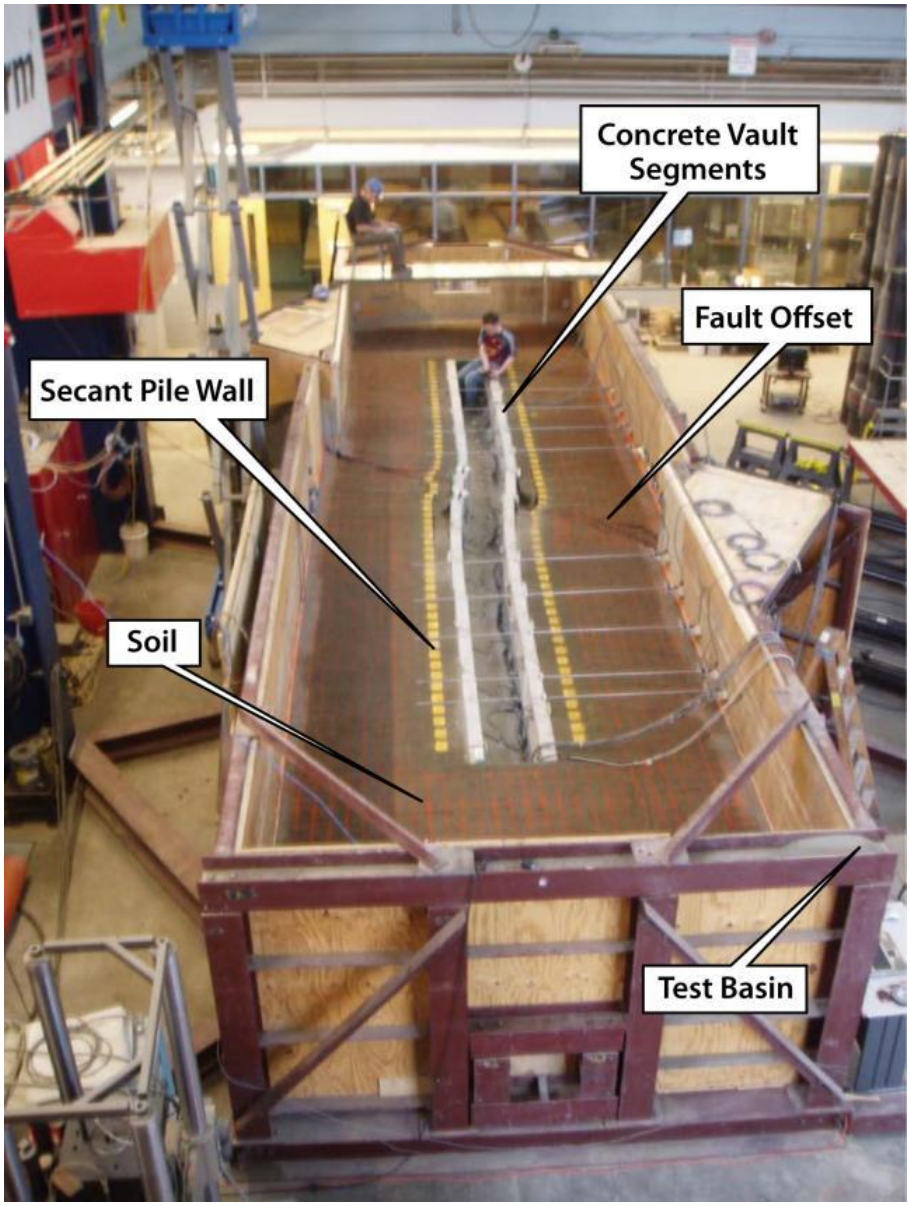


圖 3.1.44 可滑動式混凝土箱涵之模型試驗

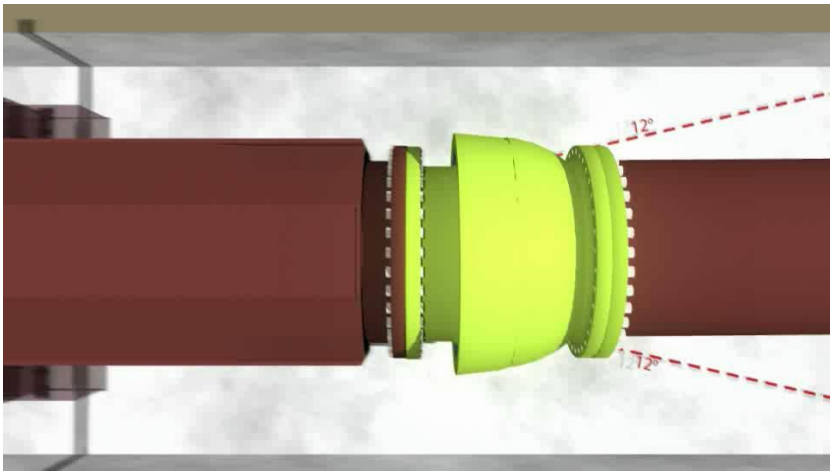


圖 3.1.45 Ball Joint 示意圖



圖 3.1.46 Ball Joint 試驗相片

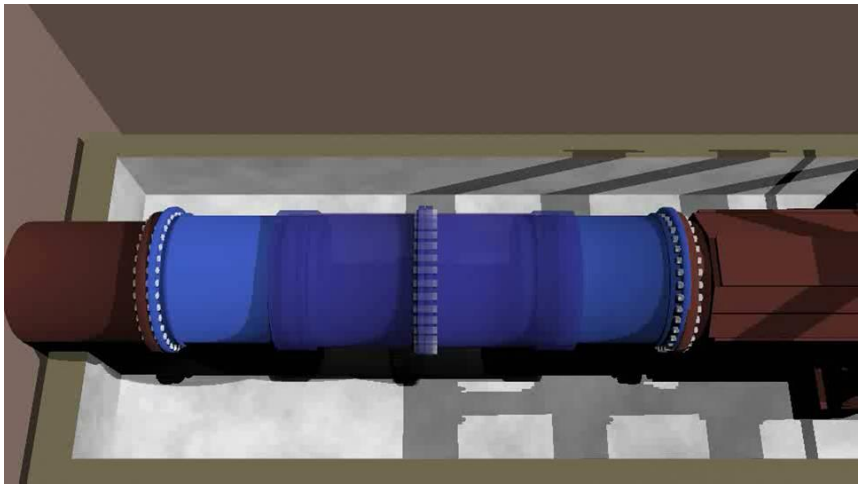


圖 3.1.47 Slip Joint 示意圖

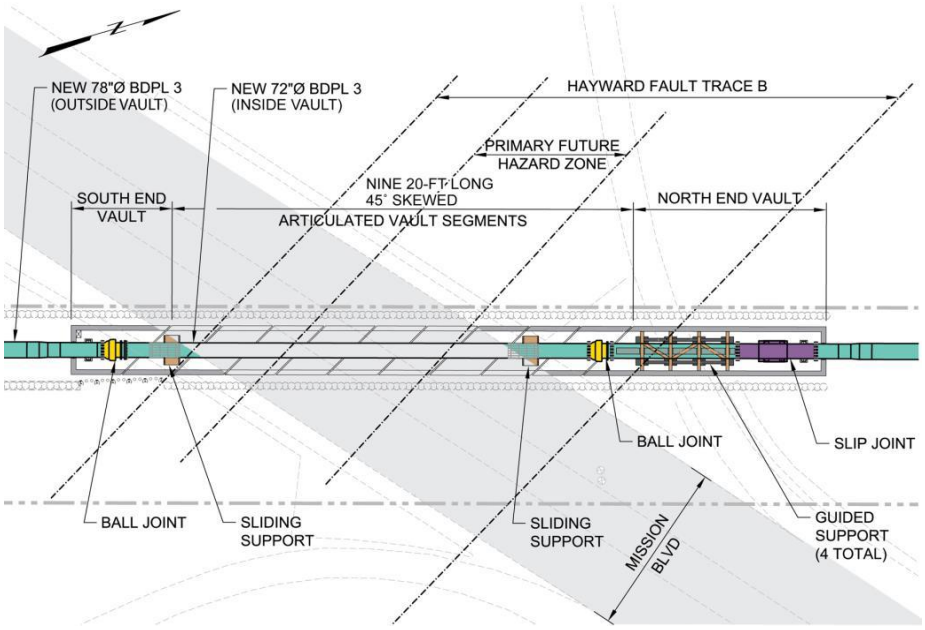


圖 3.1.48 BDPL3 號管線於 Trace B 處的設計平面圖

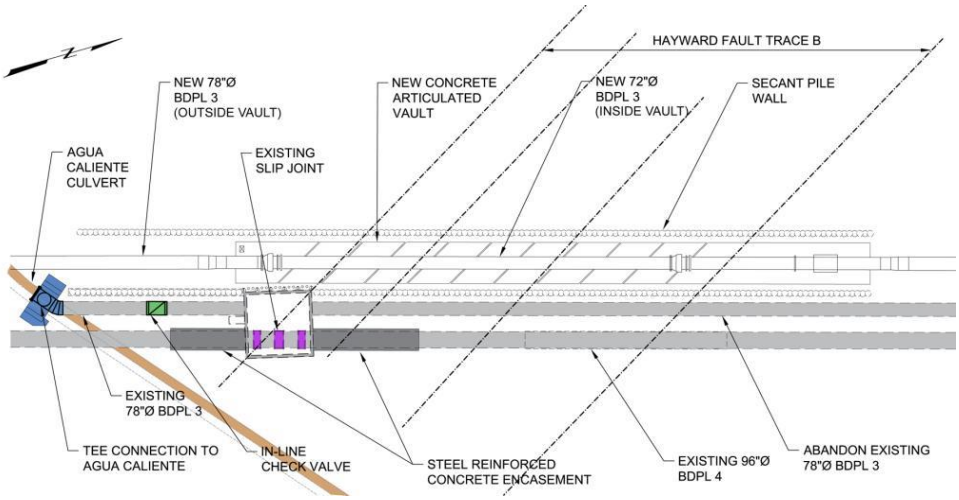


圖 3.1.49 BDPL4 號管線於 Trace B 處的設計平面圖



圖 3.1.49(a) BDPL 混凝土箱涵施作



圖 3.1.49(b) BDPL 管線按裝

圖 3.1.50 BDPLs 施工相片

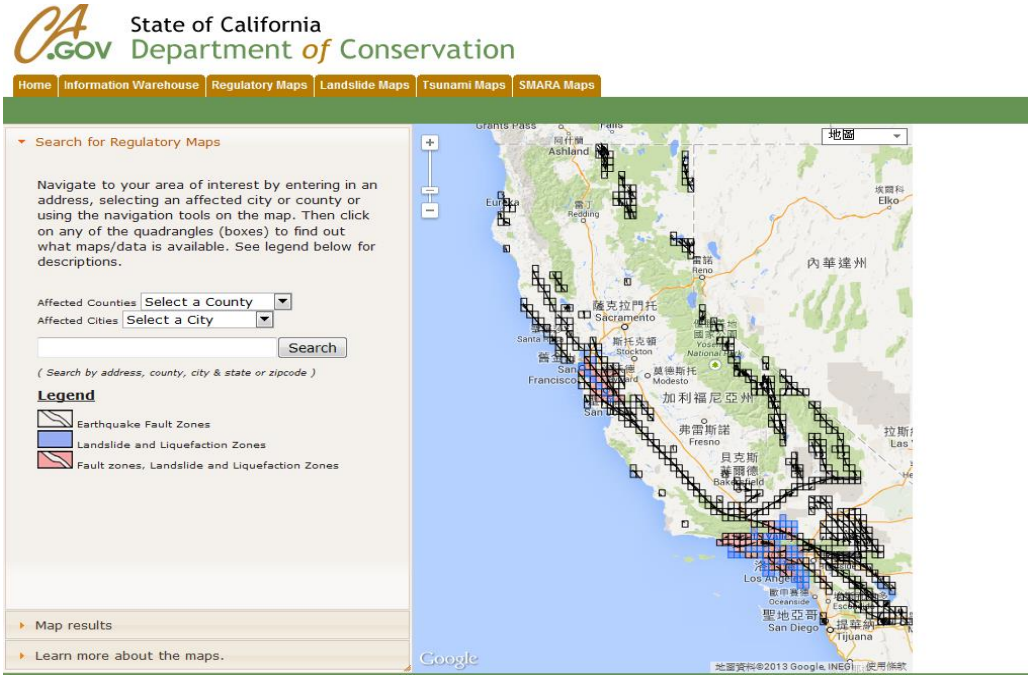


圖 3.1.51 加州政府保育部地震(活動)斷層條帶圖查詢系統。網址為 http://www.quake.ca.gov/gmaps/WH/regulatorymaps.htm。

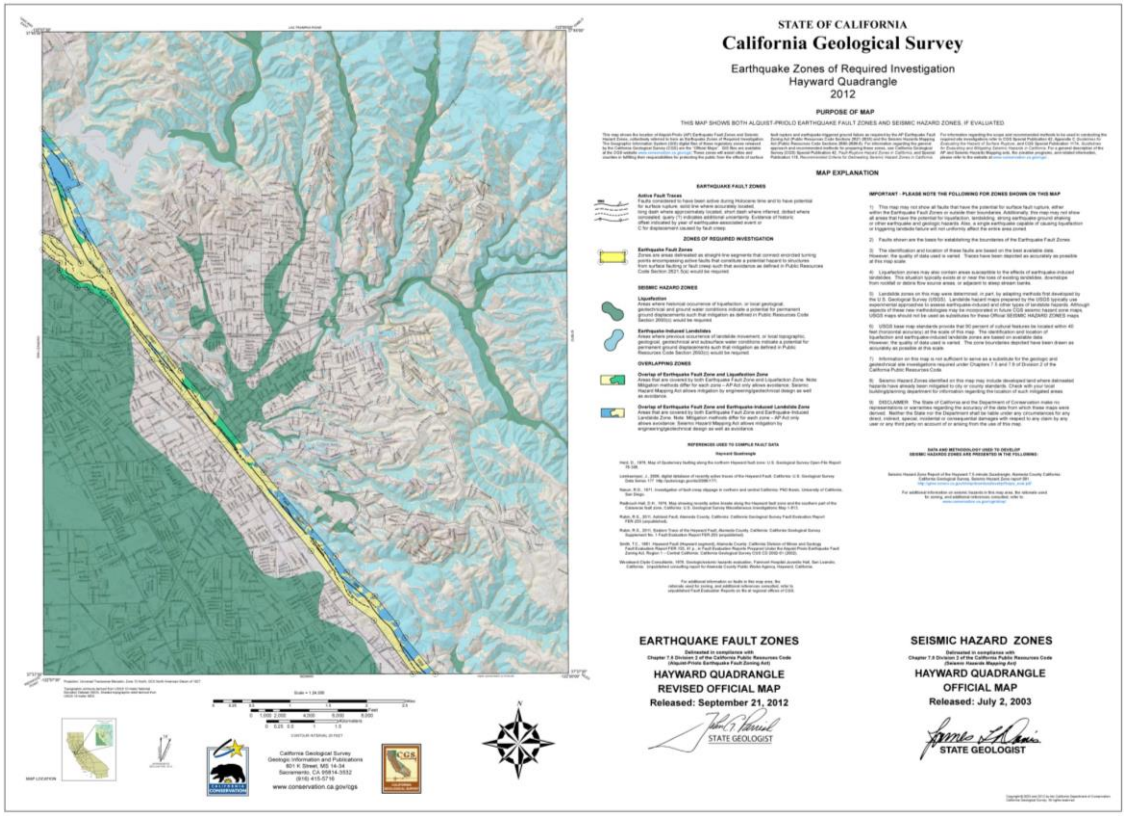


圖 3.1.52 黑沃區方形(Hayward Quadrangle)管理地圖。此圖包含地震斷層條帶(Earthquake Fault Zones)，即黃色的條帶、土壤液化區帶(Liquefaction Zones)，即綠色區及山崩區帶(Landslide Zones)，即淺藍色區，剩於的彩色顏色區為重疊區。



圖例

活動斷層

1906 C 實線表斷層跡位置明確，其上數字為歷史錯移年代，C為潛移。

長虛線表斷層跡大概位置。

短虛線表斷層跡位置為推測的。

點線表斷層跡位置遭掩蔽，加問號為不確定性更高。

地震斷層條帶邊界

兩端有特定的轉折標示點，以直實線連結的邊界。

僅一端有特定的轉折標示點的邊界，向海側以直虛線延伸。

圖 3.1.53 地震斷層條帶截取圖及圖例說明。截取自黑沃區方形管理圖(圖 3.1.38)的左上方。

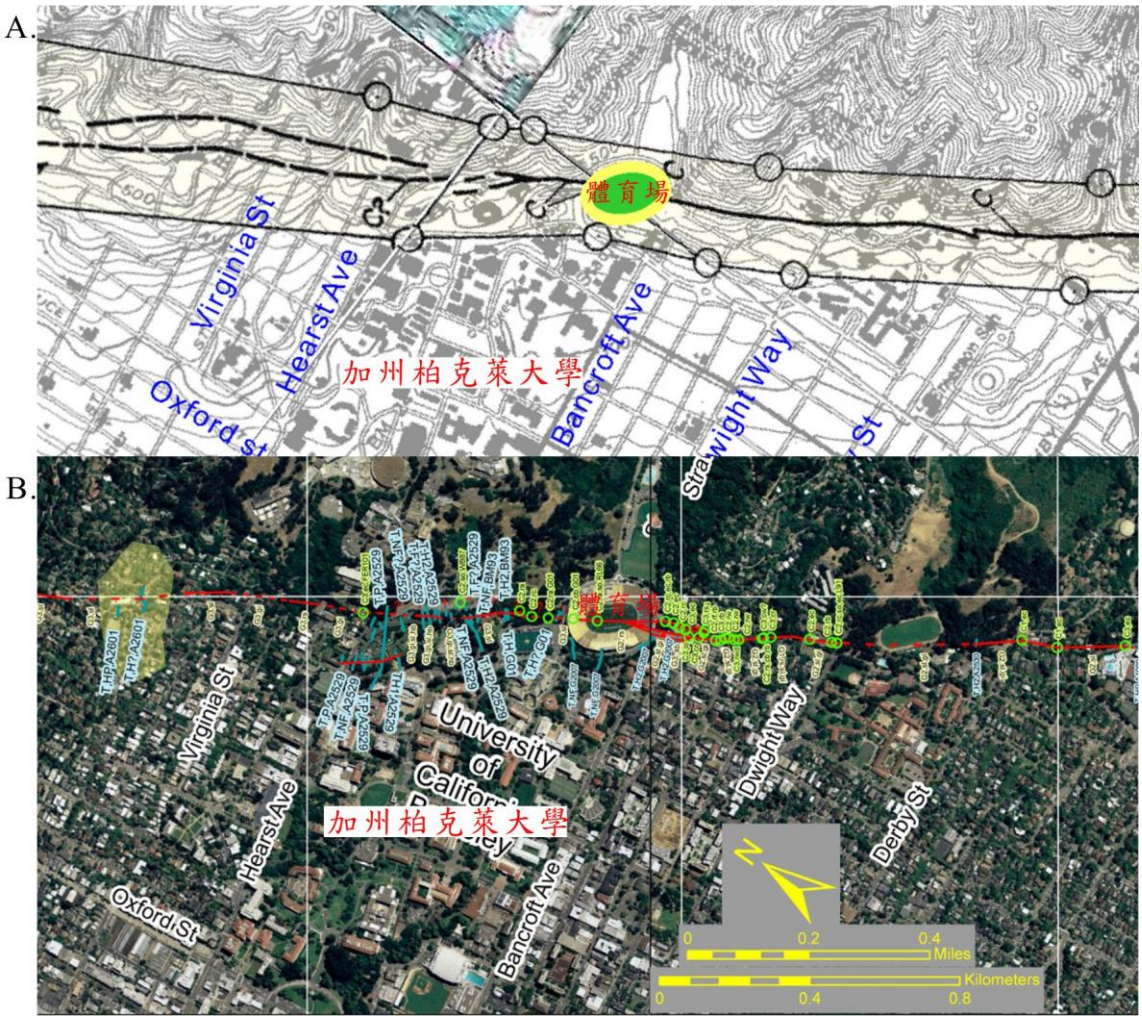


圖 3.1.54 加州柏克萊大學區黑沃斷層斷層跡。(A)加州政府頒布的地震斷層條帶圖，圖例請參考圖 3.1.53。(B)美國地質調查所頒布的斷層跡，紅色線條為黑沃斷層跡，藍色線條為用以判識斷層跡的槽溝，綠色圈圈為斷層地表潛移證據位置點。

3.2 砂箱實驗

3.2.1 逆、正斷層離心模型試驗成果

3.2.1.1 如何在逆、正斷層砂箱實驗中定義剪切帶及主破裂面

逆、正斷層錯動試驗完畢後（垂直錯動距離 5cm 模型尺寸），由壓克力視窗進行拍照及繪製斷層破裂面在地下土層的分佈情況，探討主破裂面及剪切帶的範圍。圖 3.2.1 為相同密度(Dr=70%)的砂土，在不同 g 值情況下，進行逆斷層試驗後（垂直錯動距離 50mm（模型尺寸）），觀察地下土層的變位情況。比較試驗前後，觀察十層的薄染色砂層的錯動情形，可以提供地盤內部主破裂面及剪切帶(shear band)發展的範圍及位置。

試驗後由觀景視窗拍攝的照片，利用數位化軟體來追蹤及描繪（數位化）每一次層染色砂層的變位型態，可以提供後續繪圖及計算之用，如圖 3.2.2 所示。由最下次層(layer 0)而至地表(layer 10)，連結各次層曲率半徑最小的點，可以決定上下兩條主破裂面。圖中上主破裂面用黑線來表示，而下主破裂面則用紅線來表示。這組破裂面可以代表斷層尖端發展至地表的主要軌跡，兩條主破裂面的範圍，是斷層錯動發生最大變形的區域，可以視為剪切帶或剪裂帶(shear band)的範圍。斷層錯動時，位於此範圍內的地下結構，勢必受到嚴重的損害。圖 3.2.3 則為正斷層地下染色砂層變位剖面及斷層跡的發展及演化。

3.2.1.2 純砂土逆斷層無基礎離心模型試驗成果

圖 3.2.4 為相同相對密度(Dr=70%)的砂土試體，在不同 g 值情況下(80gRtest23、40gRtest21、1gRtest20)，進行逆斷層錯動試驗後（垂直錯動距離，throw=5 cm 模型尺寸）的照片，利用數位化軟體來描繪（數位化）每一次層染色砂層的變位型態，可以繪製如圖 3.2.5 所示之圖。圖中觀察到兩條主破裂面及剪切帶的範圍及其發展情形。圖中實線代表兩條主破裂面，而虛線則代表 60 度的滑動面(Dip plane)。圖中顯示在 1g 試驗條件下相較於高 g 的試驗條件下，在兩條主破裂面間有最多的斷層錯動面，也有較寬的剪裂帶。而在 80g 的試驗條件下，有最少的錯動面及最窄的剪切帶寬度；而在 40g 的試驗條件下，則介於兩者之間。造成上述現象的主要原因為在低圍壓下（在低

的 g 值試驗條件下），砂試體受剪會有較大的膨脹角，另外在 1g 的試驗條件下，砂試體顆粒間，可能存在些微的毛細現象(capillary force)。圖中亦顯示逆斷層錯動時，主破裂面向下盤彎斜，隨著試驗 g 值的增加，向下盤彎斜的角度也較小。剪切帶範圍愈窄，相對而言，上下盤地盤的相對變位也愈大，在剪切帶的色砂層接近 90 度；而在 1g 的試驗條件則形成階梯狀。

圖 3.2.6 為在 1g 逆斷層試驗條件，在不同垂直錯動距離(throw)或垂直錯動比（throw/thickness of overburden），斷層破裂跡發展的情形(r=0 到 r=25%)。第一條破裂跡首先發生在下盤，並向下盤傾斜彎曲，在大約在 r=2.5%時，停止發展。隨著垂直錯動比繼續的增加，第二條斷層跡（下主破裂面）幾乎沿著斷層角滑動，也向下盤傾斜彎曲。大約在 r=7.5%時，延伸至地表，隨著逆斷層沿著 60 度繼續向上錯動，第一條斷層跡由於錯動的水平分量，逐漸往右移動。垂直錯動比值超過 7.5%後，第三條斷層跡（上主破裂面）開始出現在上盤，大約在 r=15%時，延伸至地表。垂直錯動比值超過 15%後，新出現的斷層跡則侷限在上、下主破裂面間發展（剪切帶），隨著垂直錯動比(r)的繼續的增加（試驗最大垂直錯動量 25%），斷層跡的數量也增加(張有毅等，2012)。

圖 3.2.7 在 80g 逆斷層試驗條件，不同覆土層厚度(16m 及 8m)，在垂直錯動距離（r=25%），斷層破裂面發展之比較。覆土層厚度 16m 的砂試體有較窄的剪切帶；而覆土層厚度 8m 的砂試體有較寬的剪切帶及較多的摺皺出現。圖 3.2.8 在 80g 逆斷層試驗條件，不同相對密度砂土試體，在垂直錯動距離 4m（r=25%），斷層破裂面發展之比較。60 度的逆斷層錯動試驗包括向右的水平位移及向上的位移。相對密度較低的砂試體，由於下盤剪力強度較低，下主破裂面比較容易向下盤移動，因而有較寬的剪切帶(洪汶宜等，2012)。

3.2.1.3 純砂土逆斷層與剛性淺基礎版的互制效應離心模型試驗成果

影響淺基礎版與逆斷層的互制因素(Gazetas et al. 2008)，包括基礎版的勁度（剛性或柔性基礎）與寬度(B)、基礎載重大小(q)、基礎版位置與自由場逆斷層跡出露地表位置的相對位置(s/B)。其中 s=淺基礎邊緣距自由場逆斷層跡出露地表位置的距離；B 代

表基礎版寬度。表 3.2.1 為本研究剛性淺基礎版模型試驗的試驗編號及試驗條件，本研究共使用四種不同寬度及厚度的基礎版(A、B、C 及 D)，分別代表不同樓層高的載重及不同的基礎寬度，如表 3.2.2 及圖 3.2.9 的照片所示。試驗編號 80gRtest#-F-%代表逆斷層錯動與剛性淺基礎互制的離心模型試驗，其中%代表試驗時剛性基礎的種類（本研究共使用 A、B、C 及 D 四種不同基礎版）。圖 3.2.10 則為不同試驗，不同剛性淺基礎版與逆斷層跡，出露地表相對位置關係的示意圖。圖 3.2.11 及圖 3.2.12 為逆斷層錯動試驗不同垂直錯動量，B 基礎版在不同 s/B 的情況下，地表變形剖面之比較：(a)s/B=0；(b)s/B=0.69；(c)s/B=1；(d)自由場。圖 3.2.13 中則顯示座落於上盤的剛性淺基礎(s/B=0)，有較大的水平位移、垂直頂升量及旋轉角，但上盤的土壤不會覆蓋在基礎版之上。座落於下盤的剛性淺基礎(s/B=1)，有較小的水平位移、垂直頂升量及旋轉角，但上盤的土壤會大量覆蓋在基礎版之上。而座落於上下盤間的剛性淺基礎(s/B=0.69)，基礎版的水平位移、垂直頂升量及旋轉角介於兩者之間(s/B=0 及 s/B=1 間)，而上盤的土壤也會覆蓋在基礎版之上。圖 3.2.14 為 921 集集地震建築物受到逆斷層錯動，土壤被頂升至二層樓高之景象，額外增加的水平力可能是造成該樓房破裂的原因。座落於逆斷層上下盤間及下盤的基礎，上盤的土壤會覆蓋於基礎版上，作用於建物牆上的土壓力應以被動土壓力來設計。

圖 3.2.15 及圖 3.2.16 為逆斷層錯動試驗，在不同 s/B 的情況下，B 基礎版對逆斷層跡出露地表位置及主破裂面範圍影響之比較。圖中顯示座落於上盤 (s/B=0)或座落於上下盤間(s/B=0.69)的剛性淺基礎，會導致下主破裂面容易向下盤彎斜發展，因此上下主破裂面的範圍也較寬。而座落於下盤的剛性淺基礎(s/B=1)，由於基礎版的垂直載重，增加了基礎版底下土壤的有效應力，造成下主破裂面不容易向下盤發展，上下主破裂面的範圍相較基礎座落在上盤者為小，甚至也較自由場之主破裂面範圍為小。

圖 3.2.17 及圖 3.2.18 為逆斷層試驗不同垂直錯動量，不同載重基礎版在相同 s/B=0.69 的情況下，地表變形剖面之比較：(a)B 基礎(q=52.9kPa)；(b)C 基礎(q=86.0kPa)；(c)自由場。圖 3.2.19 顯示座落於上下盤間的剛性基礎，當基礎載重較大時，基礎版的水平位移及基礎的旋轉角較小。圖 3.2.20、圖 3.2.21 及圖 3.2.22 顯示淺基礎位於上下

盤間，基礎荷載較大(q=86.0kPa)的基礎版，會導致下主破裂面不容易向下盤發展，也不容易出露地表，剪裂帶較窄，也不容易出露地表。圖 3.2.23 為逆斷層錯動試驗，在相同 s/B=0 的情況下，不同寬度的淺基礎版對逆斷層跡出露地表位置及主破裂面範圍之比較：(a)8.06cm；(b)4.03cm；(c)自由場。圖 3.2.2-24 則為逆斷層試驗，在相同 s/B=0 的情況下，不同寬度的淺基礎版旋轉角、水平位移之比較。圖中顯示淺基礎位在上盤，較寬的基礎，有稍大的水平位移、垂直頂升量及旋轉角。圖 3.2.25 為逆斷層錯動試驗後，在相同 s/B=0 及相同載重的情況下，不同寬度的淺基礎版試驗後地表面斷層跡出露景象的比較。而圖 3.2.26 為逆斷層試驗，在相同 s/B=0 及相同載重的情況下，不同寬度的淺基礎版試驗後及自由場地下斷層跡出露景象的比較。試驗成果顯示，較寬的基礎版地表破裂跡出現在較遠離基礎版處，也有較多的砂土覆蓋於基礎版上。

3.2.1.4 純砂土正斷層無基礎離心模型試驗成果

圖 3.2.27 為 1gNtest34（相對密度 Dr=70%）的純砂土，在不同垂直陷落量下，利用拍攝影像來紀錄斷層跡發展的過程。當正斷層錯動時，首先由斷層尖端(fault tip)在上盤發展出第一條接近垂直的破裂跡（紅色虛線），並且在 r=2.5%左右到達地表。在斷層角為 60^{o} 的正斷層錯動中，錯動位移向量在垂直方向較水平方向有較大的分量，造成上盤的陷落，因此首先發展接近垂直的破裂跡。然後由於水平方向的往外位移，第二條破裂跡（紅色實線）大約在 r=3.75%時，從上盤由上往下發展，同時在下盤也出現由下往上角度約 45^{o} 的反向斷層（黑色實線）。此第三條破裂跡主要由於落門效應(trap door)所造成土壤拱化現象(soil arching)，但是隨著垂直陷落量的增加，土拱由底部逐漸向上破壞所造成的破裂跡。當第二條破裂跡到達試體底部。隨後正斷層繼續的陷落（大約 r=8.75%），造成第四條破裂跡在第一及第二破裂跡間，由下往上逐漸發展，而第三條破裂跡亦出露至地表。在 r 大約 15%時，第四條破裂跡亦發展至地表。當正斷層繼續陷落，第三條破裂跡由於落門寬度及垂直陷落量逐漸的增加，造成第三條破裂跡逐漸向上盤彎斜，而形成地塹，但是第四條破裂跡，則侷限在第一條及第二條破裂跡間發展。圖 3.2.28 為正斷層錯動時在不同垂直錯動量下，地表變位剖面及地下破裂跡之發展及演化。

3.2.1.5 純砂土正斷層與剛性淺基礎版的互制效應離心模型試驗成果

影響淺基礎版與正斷層的互制因素(Gazetas et al. 2008; Bray, 2001)，與逆斷層相同，包括基礎版的勁度（剛性或柔性基礎）與寬度(B)、基礎載重大小(q)、基礎版位置與自由場正斷層跡出露地表位置的相對位置(s/B)。圖 3.2.29 為本研究目前已經完成不同剛性淺基礎版與正斷層跡，出露地表相對位置關係的示意圖。圖 3.2.30 為正斷層錯動試驗不同垂直錯動量，自由場(1g 及 80g 情況下)及 B 基礎版在 s/B=1 的情況下，地表變形剖面之比較。圖 3.2.31 為正斷層錯動試驗(70g)，在不同垂直錯動量垂直錯動量下，B 基礎版座落於 s/B=0 的情況下，地表變形剖面之比較。圖 3.2.32、圖 3.2.33 及圖 3.2.34 分別為正斷層(80g 及 70g)垂直錯動量 5cm 後，B 基礎版座落於 s/B=0，s/B=1 處，地下破裂跡的比較。圖 3.2.35 為正斷層(70g)垂直錯動量 5cm 後，B 基礎版座落於 s/B=0 及 s/B=1 處，地下破裂跡的比較。綜合上面的試驗結果顯示基礎的存在、基礎座落位置均會影響地表的變位剖面及地下斷層跡的發展。圖 3.2.36 為正斷層(70g)不同垂直錯動量下，B 基礎版座落於 s/B=0 及 s/B=1 處，基礎版的旋轉角、水平位移及垂直位移之比較。圖 3.2.37 為正斷層在不同垂直錯動量，自由場及 B 基礎版座落於 s/B=1 處，地表變位剖面與基礎版傾斜及位移的情形地下破裂跡的比較。各圖中可以明顯展示淺基礎的存在，會修飾地下破裂跡的發展及地表的變形剖面。基礎版的旋轉角、水平位移及垂直位移的大小與 s/B 值有關。

圖 3.2.38 為成長正斷層與非成長斷層破裂跡之比較，圖中正斷層第一次錯動後，上盤陷落後如在上盤有堆積物，會造成轉向斷層較為明顯。

3.2.1.6 純黏土逆、正斷層離心模型試驗成果

本研究採用兩種不同不排水剪力強度（$s_{u=}$116kPa 及 $s_{u=}$46kPa）的人工黏土試體來進行正逆斷層錯動試驗。圖 3.2.39、圖 3.2.40、圖 3.2.41 分別為不同剪力強度純黏土試體正斷層錯動試驗，地表剖面、地表裂縫及地下破裂跡發展結果之比較。純黏土不排水剪力強度 S_u=116kPa 的試體比較脆性(brittle)，因此有明顯的垂直破裂面，以及較深及較寬的裂縫，但裂縫數量較少，地下破裂跡也較明顯，範圍也較窄，地表變形剖面的範圍也較窄；相反的，純黏土試體不排水剪力強度 s_u=46kPa 的試體較有延展性

(ductile)，因此垂直破裂面不明顯，地下破裂跡也較窄，地表面的裂縫深度較淺，但有較多的裂縫發生在地表，地表變形剖面的範圍也較寬廣。

圖 3.2.42 及圖 3.2.43 分別為不同剪力強度純黏土試體逆斷層錯動試驗，地表剖面、地表裂縫及地下破裂跡發展結果之比較。純黏土不排水剪力強度 $s_{u=}$116kPa 的試體，地表變形剖面的範圍；相反的，純黏土試體不排水剪力強度 $s_{u=}$46kPa 的試體較有延展性(ductile)，地表變形剖面的範圍也較寬廣。

圖 3.2.44 為不同剪力強度純黏土試體及砂試體正斷層錯動試驗，地表剖面形狀及範圍結果之比較。純砂土試體有最窄的變形範圍，但有最陡的坡度。但是純時黏土試體，隨著剪力強度的增加，地表變形的影響則變小，但裂縫深度則增加。圖 3.2.45 為不同剪力強度純黏土試體及砂試體逆斷層錯動試驗，地表剖面結果之比較。純砂土試體有最窄的變形範圍，但有最陡的坡度。但是純黏土試體，隨著剪力強度的增加，地表變形的影響則變小。

3.2.1.7 砂黏土互層心逆、正斷層離心模型試驗成果

本研究利用砂土上覆黏土層的互層地盤，來進行正逆斷層錯動試驗，來探討地表及地下變形剖面、地下斷層跡的發展，並進行比較。圖 3.2.46 及圖 3.2.47 為純黏土試體及粘土及砂互層試體，正斷層錯動試驗，地表剖面結果之比較。圖中顯示上覆砂層之試體不會產生地表裂縫。圖 3.2.48 為純砂土試體及黏土及砂土互層試體，正斷層錯動試驗，地下破裂跡之比較，圖中顯示上覆砂層之試體，位於砂土層中之破裂跡，與純砂土之破裂跡類似。圖 3.2.49 及圖 3.2.50 為黏土及砂土互層試體，正斷層錯動試驗，砂及黏土界面之變形剖面，圖中顯示砂土與黏土界面形成河階地形。

圖 3.2.51 為純黏土試體及黏土砂互層試體，逆斷層錯動試驗，地表剖面結果之比較。圖中顯示上覆砂層之試體不會產生地表裂縫，而且在坡腳處有較陡的坡度。圖 3.2.52 為純黏土試體及黏土砂土互層試體，逆斷層錯動試驗，地下破裂跡之比較。圖 3.2.53 及圖 3.2.54 為黏土砂土互層試體，逆斷層錯動試驗，砂及黏土界面之變形剖面，圖中顯示砂土與黏土界面形成斷堰地形。圖 3.2.55 為砂土及黏土砂土互層試體，逆斷層錯動地下破裂跡之比較。圖中顯示砂黏土互層在水平方向有較平緩的破裂跡。



(a) 80g 試驗條件(80gRtest23)



(b) 40g 試驗條件(40gRtest21)



(c)1g 試驗條件(1gRtest20)

圖 3.2.1 在不同試驗 g 值情況下，進行逆斷層試驗後地下土層變形剖面。(a)80g 試驗條件；(b)40g 驗條件；(c)1g 試驗條件。

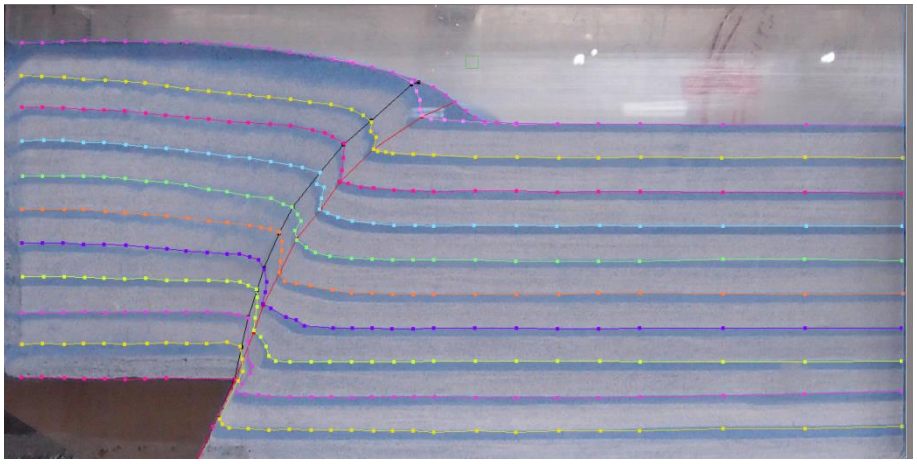
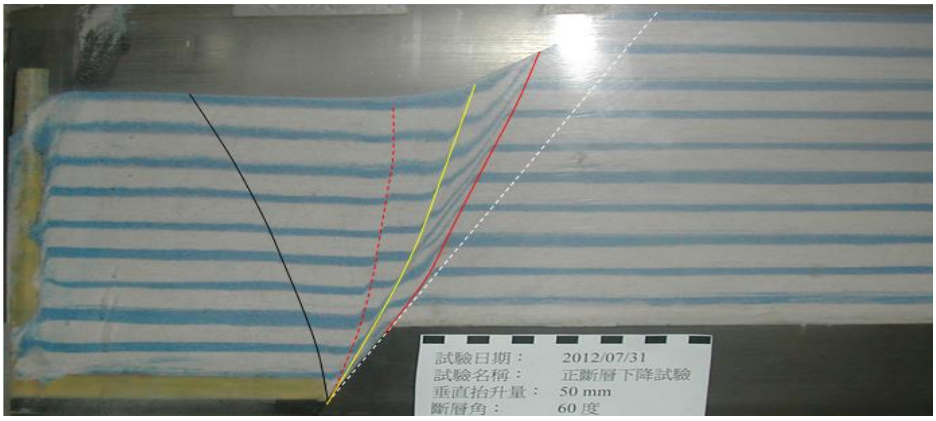
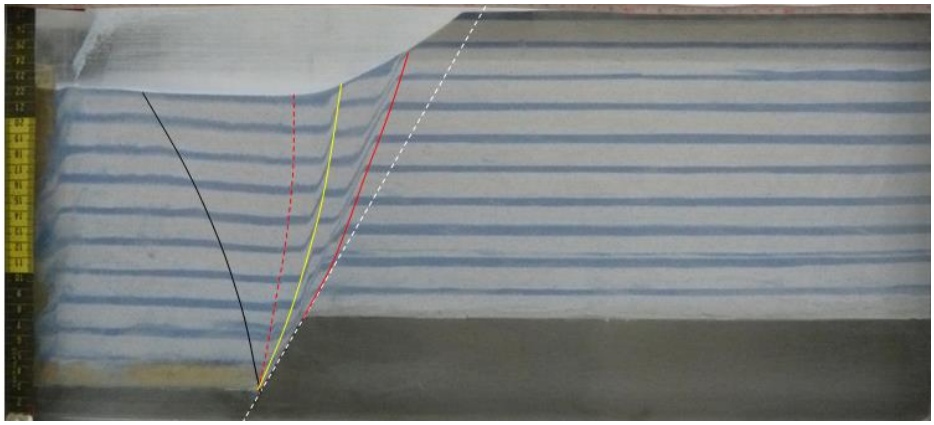


圖 3.2.2 逆斷層地下染色砂層變位剖面的數位化(80gRtest23)



(a) 80g



(b) 40g

圖 3.2.3 正斷層地下染色砂層變位剖面及斷層跡的發展及演化

表 3.2.1 剛性淺基礎版模型試驗的試驗編號及試驗條件

試驗編號	g 數	Dr(%)	模擬斷層型式	基礎型式	模擬基礎樓層數	s/B
80gNtest35-F-A	80	70	正斷層	A	3	0.5
80gRtest39-F-B	80	70	逆斷層	B	5	0.69
80gRtest41-F-B	80	70	逆斷層	B	5	0
80gRtest47-F-C	80	70	逆斷層	C	9	0.69
80gRtest52-F-B	80	70	逆斷層	B	5	1
40gRtest57-F-D	40	70	逆斷層	D	5	0
80gNtest58-F-B	80	70	正斷層	B	5	1
70gRtest61-F-D	70	70	逆斷層	D	5	0
70gNtest62-F-B	70	70	正斷層	B	5	1.17
70gNtest63-F-B	70	70	正斷層	B	5	0.17
70gNtest64-F-B	70	70	正斷層	B	5	0.86
70gNtest65-F-C	70	70	正斷層	C	9	0.86
70gNtest66-F-D	70	70	正斷層	D	5	1.02
70gNtest67-F-A	70	70	正斷層	A	3	0.8
70gNtest70-F-B	70	70	正斷層	B	5	0
70gNtest71-F-B	70	70	正斷層	B	5	1

表 3.2.2 模型剛性淺基礎版的尺寸及載重

基礎型式	基礎長* (cm)	基礎寬 B* (cm)	基礎厚* (cm)	模型淺基礎重（N）	接觸壓力 q (kPa)
A 模型基礎	30 (24 m)	12.5 (10 m)	0.5 cm (0.4 m)	14.7 N	31.4 kPa
B 模型基礎	30 (24 m)	8.06 (6.5 m)	0.89 cm (0.7 m)	16 N	52.9 kPa
C 模型基礎	30 (24 m)	8.06 cm (6.5 m)	1.44 cm (1.1 m)	26.2 N	86.0 kPa
D 模型基礎	30 (24 m)	4.03 cm (3.25 m)	0.89 cm (0.7 m)	8 N	52.9 kPa

*括弧內數字代表基礎的原型尺寸，單位為公尺。

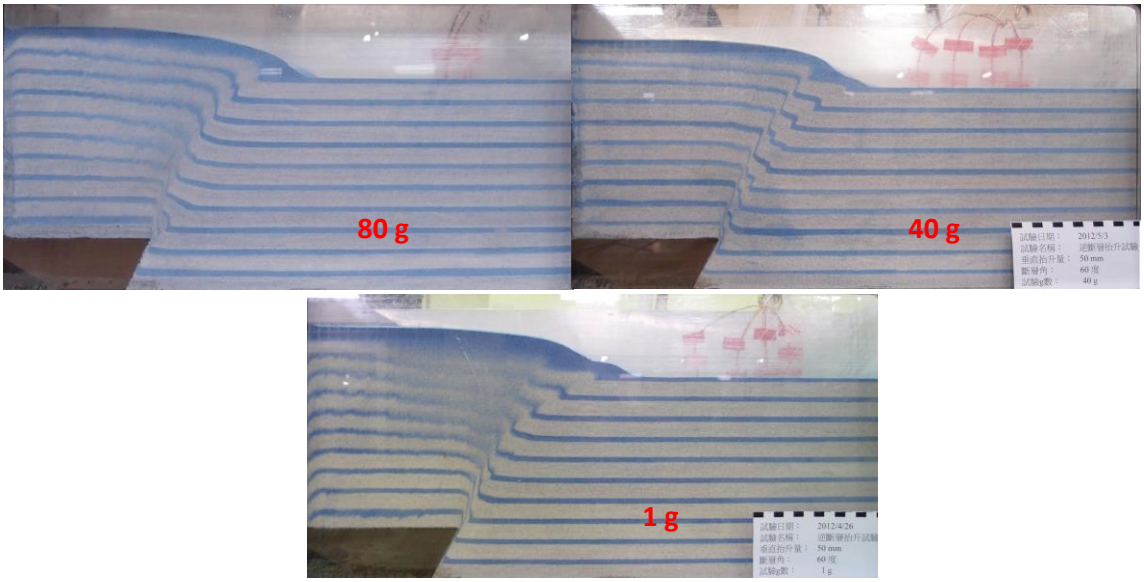
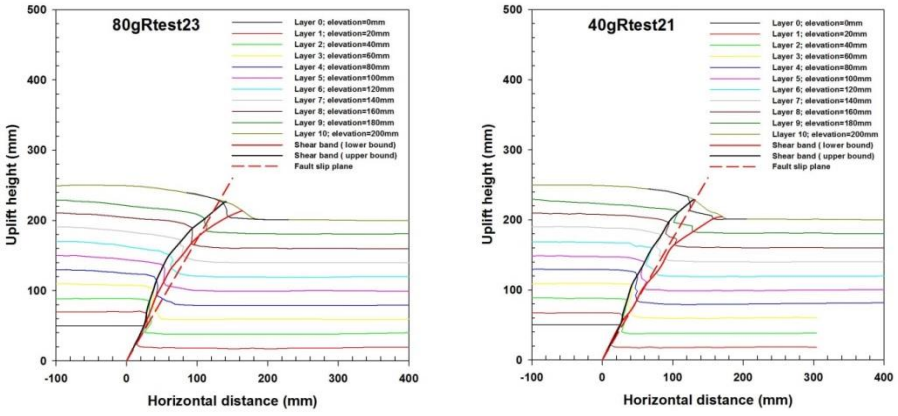
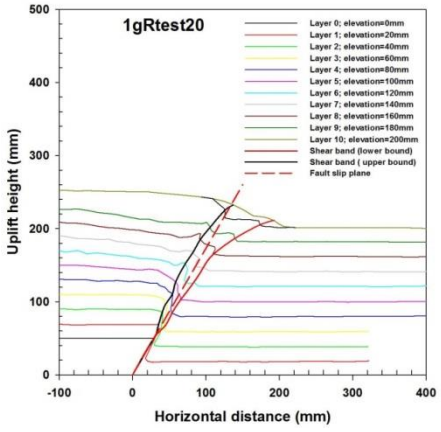


圖 3.2.4 在不同 g 值進行砂試體逆斷層錯動試驗後之破壞照片及比較

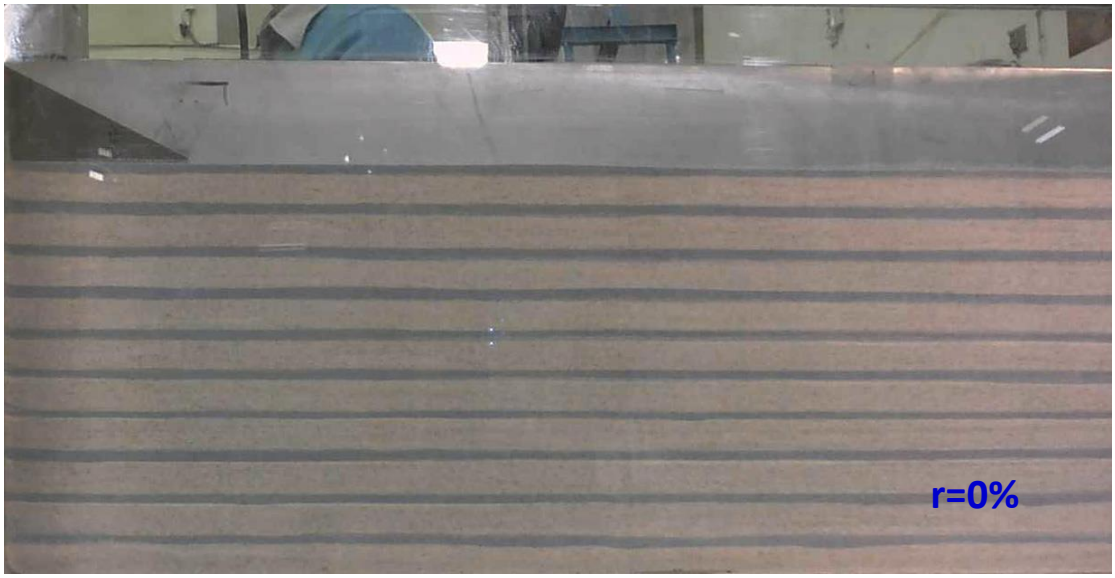


(a)tested at 80g (b)tested at 40g

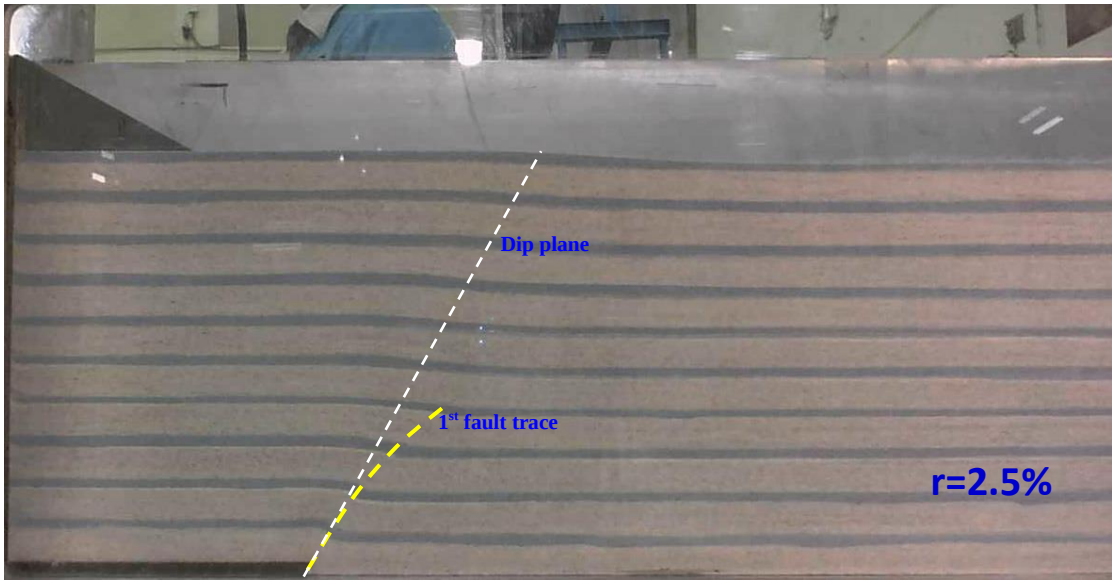


(c)tested at 1g

圖 3.2.5 在不同 g 值進行砂試體逆斷層錯動試驗，數位化後地下染色砂次層變位及主破裂面。(a)80g；(b)40g；(c)1g。

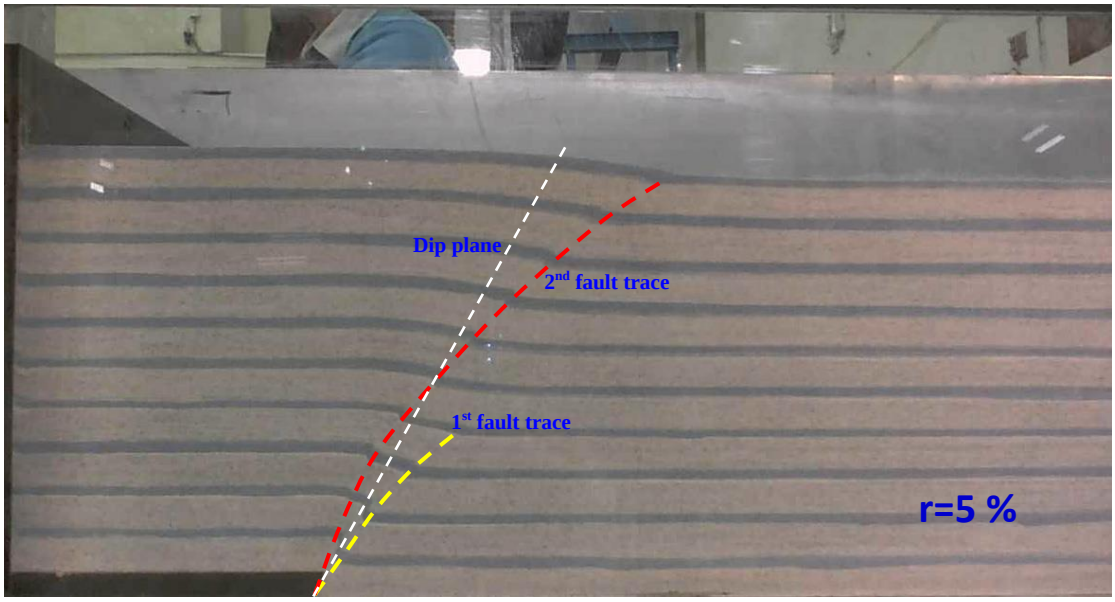


(a) Throws=0cm (r=0%)

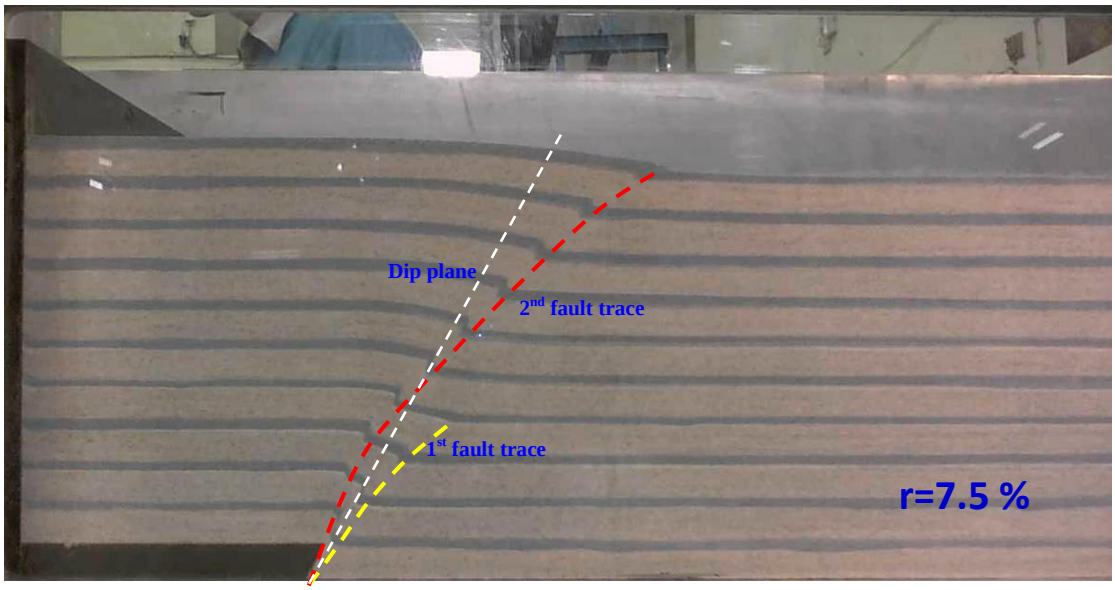


(b) Throws=0.5cm (r=2.5%)

圖 3.2.6(a)-(k) 1g 逆斷層試驗條件，不同垂直錯動距離，斷層破裂面發展情形

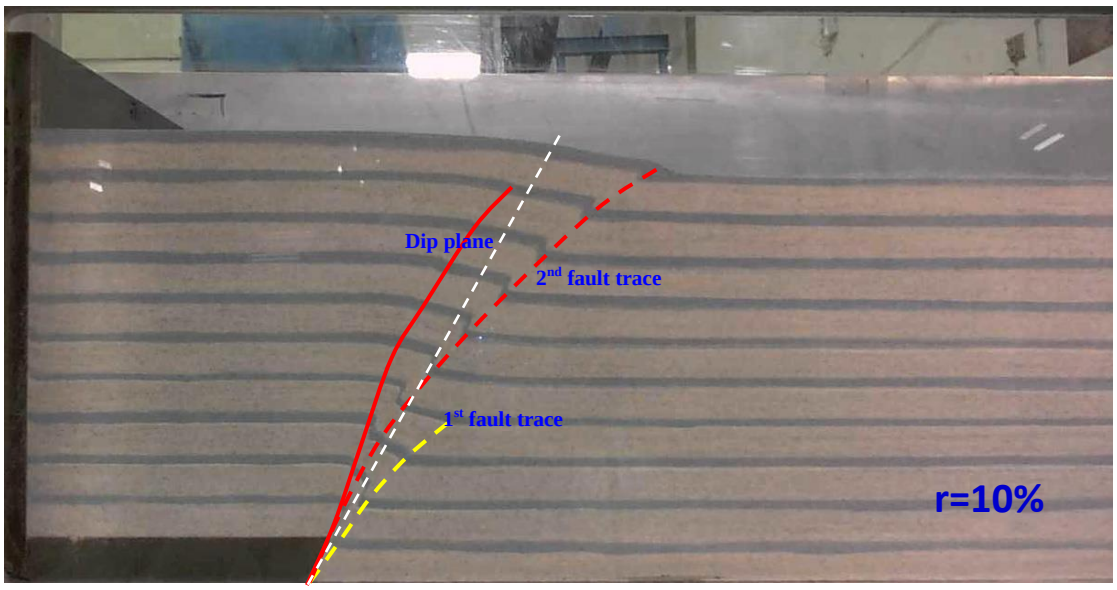


(c) Throws=1cm (r=5%)

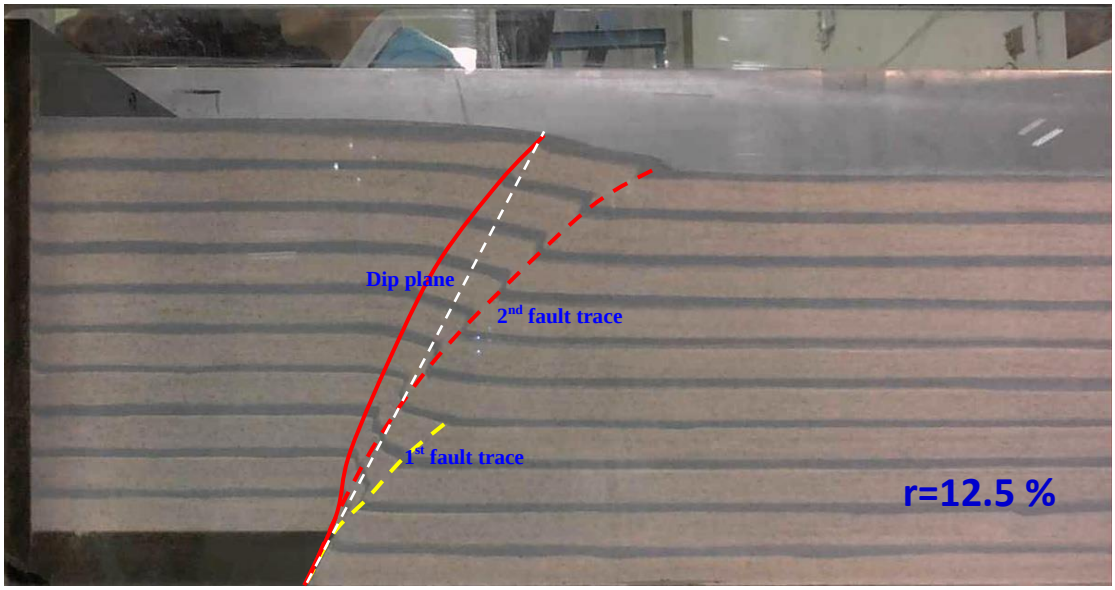


(d) Throws=1.5cm (r=7.5%)

圖 3.2.6(a)-(k) 1g 逆斷層試驗條件，不同垂直錯動距離，斷層破裂面發展情形(續)

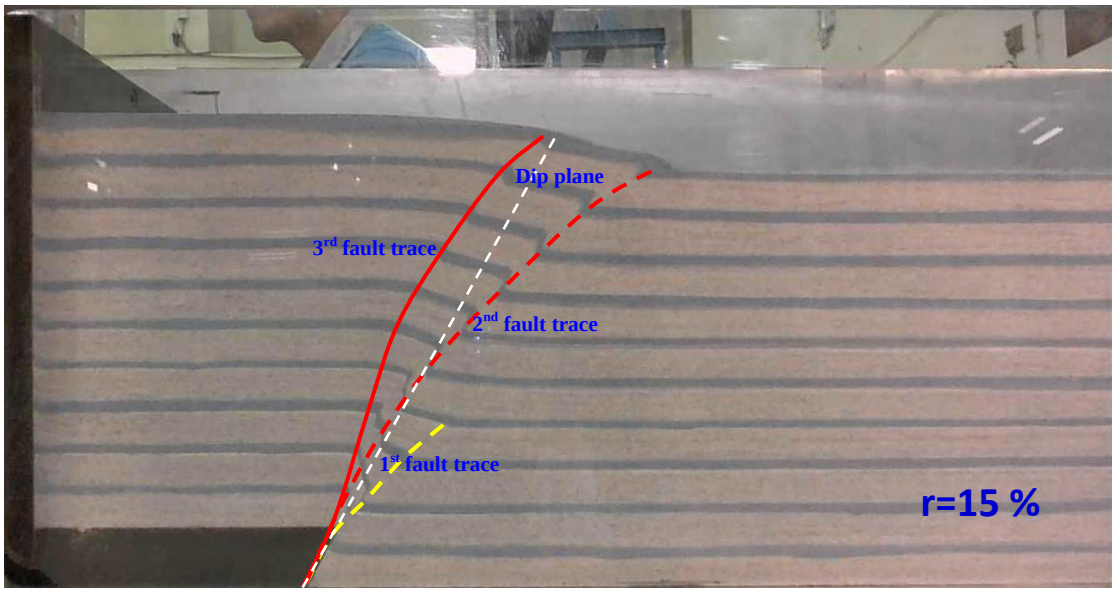


(e) Throws=2.0cm (r=10%)

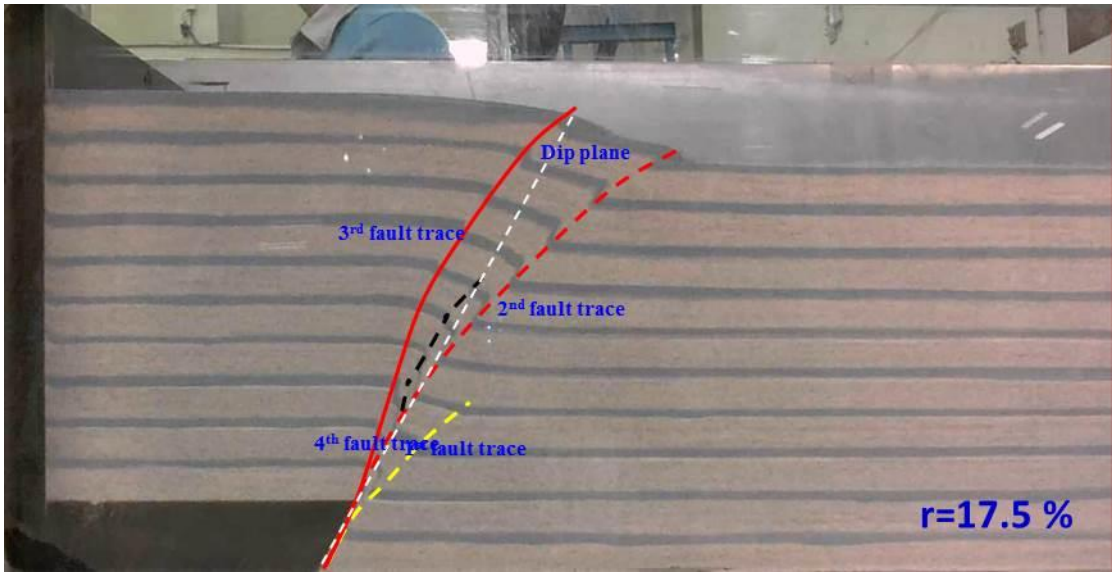


(f) Throws=2.5cm (r=12.5%)

圖 3.2.6(a)-(k) 1g 逆斷層試驗條件，不同垂直錯動距離，斷層破裂面發展情形(續)

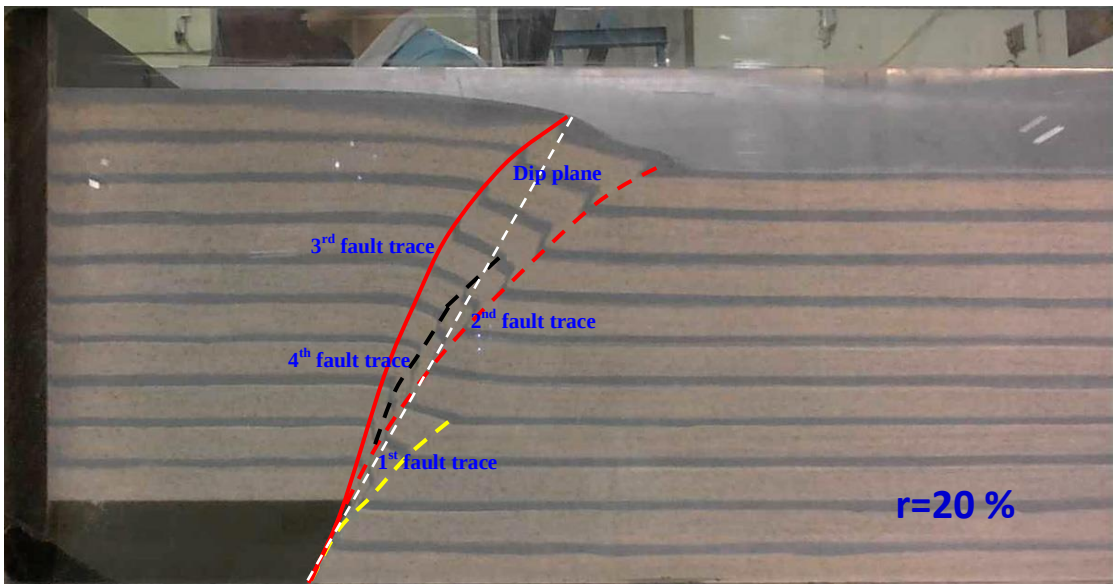


(g) Throws=3.0cm (r=15%)

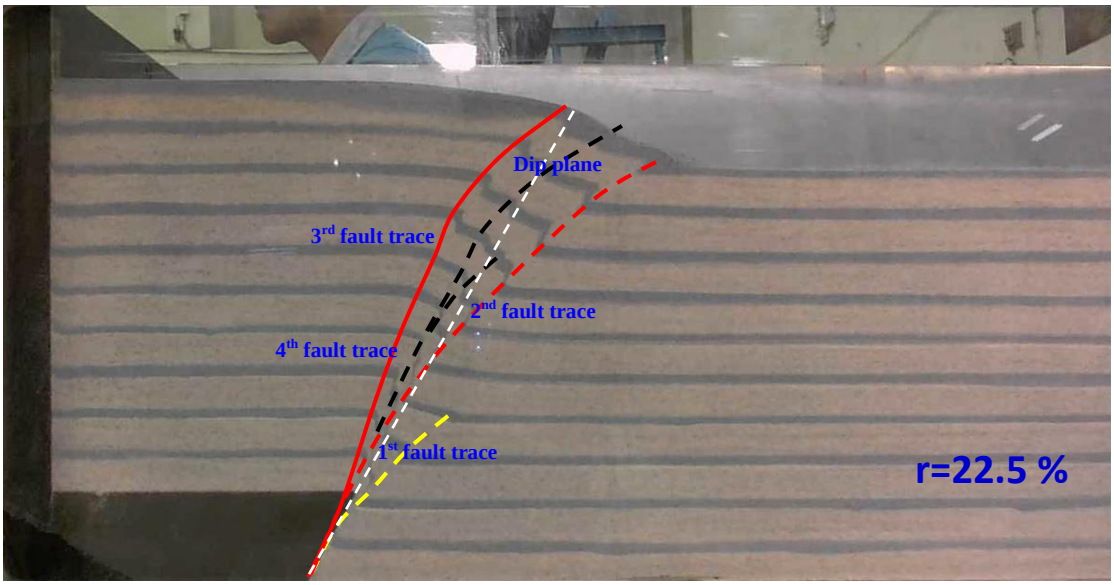


(h) Throws=2.5cm (r=17.5%)

圖 3.2.6(a)-(k) 1g 逆斷層試驗條件，不同垂直錯動距離，斷層破裂面發展情形(續)

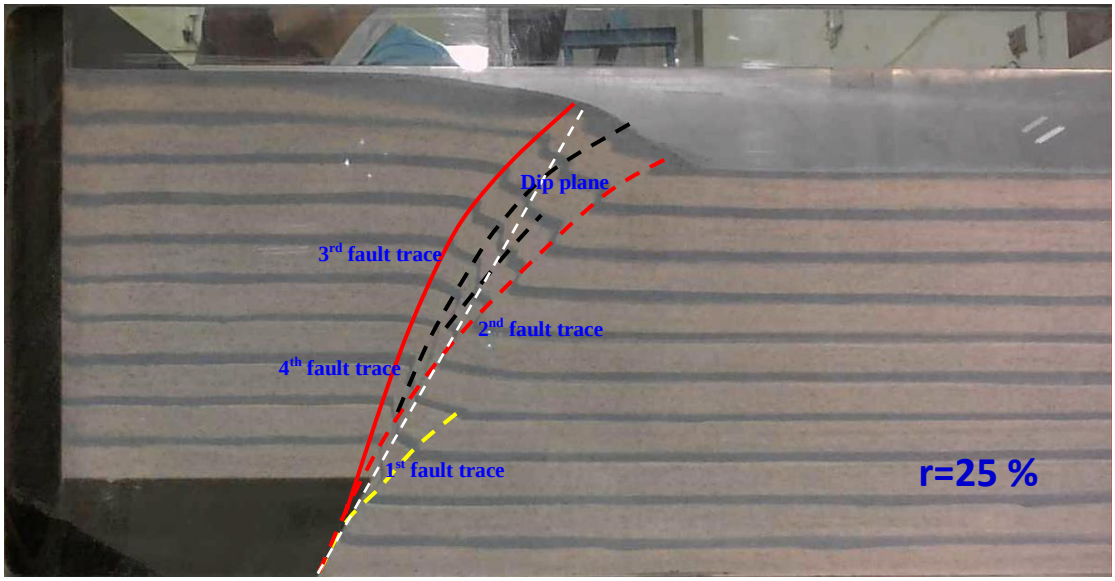


(i) Throws=4.0cm (r=20%)



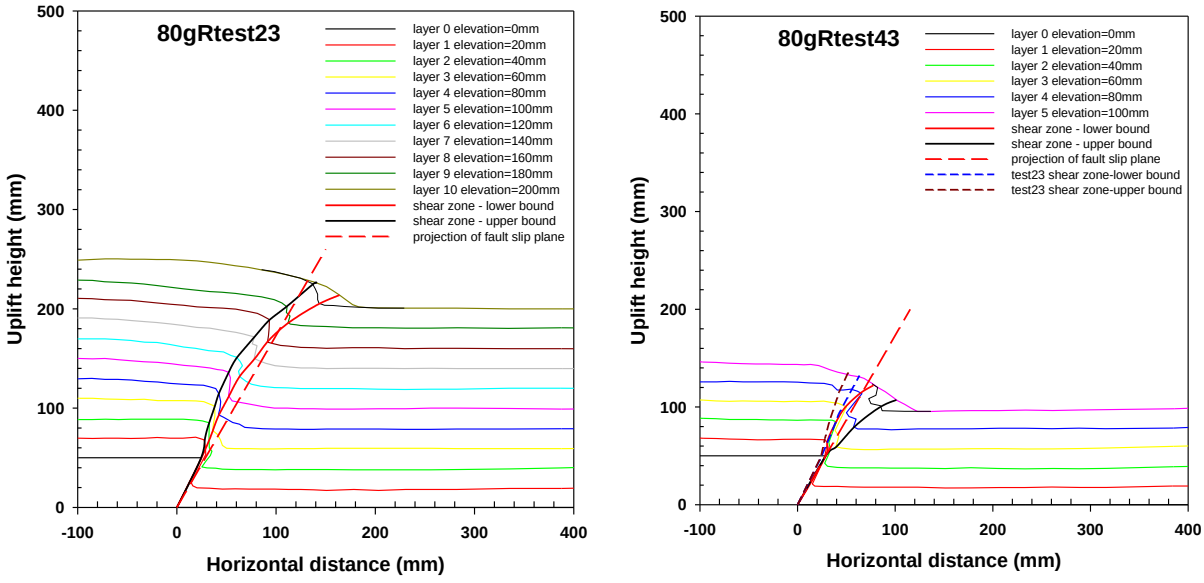
(j) Throws=4.5cm (r=22.5%)

圖 3.2.6(a)-(k) 1g 逆斷層試驗條件，不同垂直錯動距離，斷層破裂面發展情形(續)



(k) Throws=5.0cm (r=25%)

圖 3.2.6(a)-(k) 1g 逆斷層試驗條件，不同垂直錯動距離，斷層破裂面發展情形(續)



(a) (b)

圖 3.2.7 在 80g 逆斷層試驗條件，垂直錯動距離 4m(r=25%)，不同覆土層厚度(16m 及 8m)，破裂面發展比較。(a)覆土層厚度 16m；(b)覆土層厚度 8m

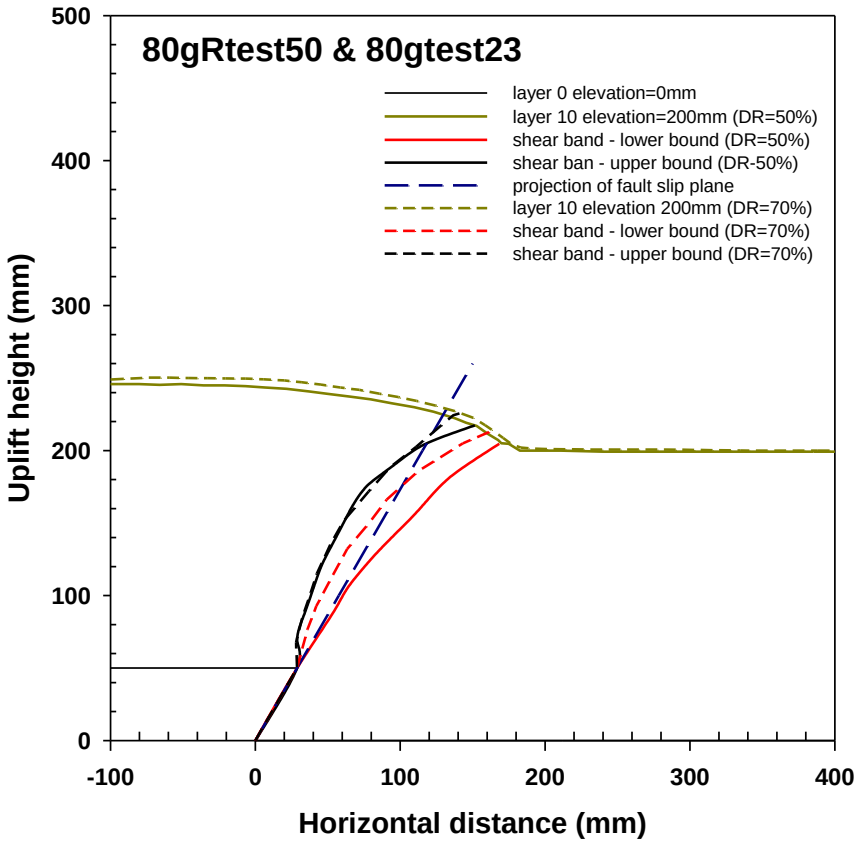
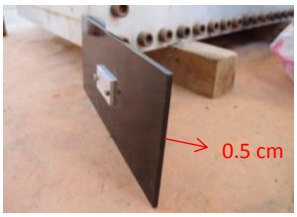
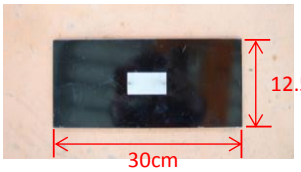


圖 3.2.8 在 80g 逆斷層試驗條件，垂直錯動距離 4m(r=25%)，不同相對密度砂土試體破裂面發展比較

A-Footing

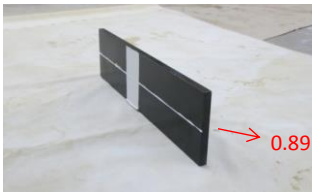


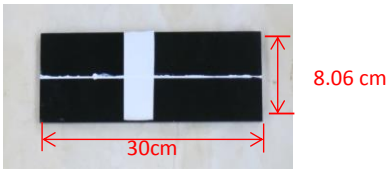


80g時之接觸應力：31.4 kPa

→模擬現地建築物為3層樓之情形

B-Footing



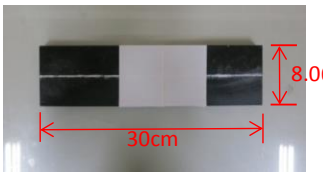


80g時之接觸應力：52.9 kPa

→模擬現地建築物為5層樓之情形

C-Footing



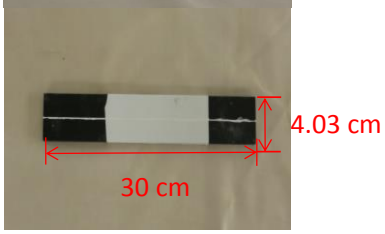


80g時之接觸應力：86.0 kPa

→模擬現地建築物為9層樓之情形

D-Footing





80g時之接觸應力：52.9 kPa

→模擬現地建築物為5層樓之情形
基礎寬度 3.25 m

圖 3.2.9 剛性基礎版基本性質及照片

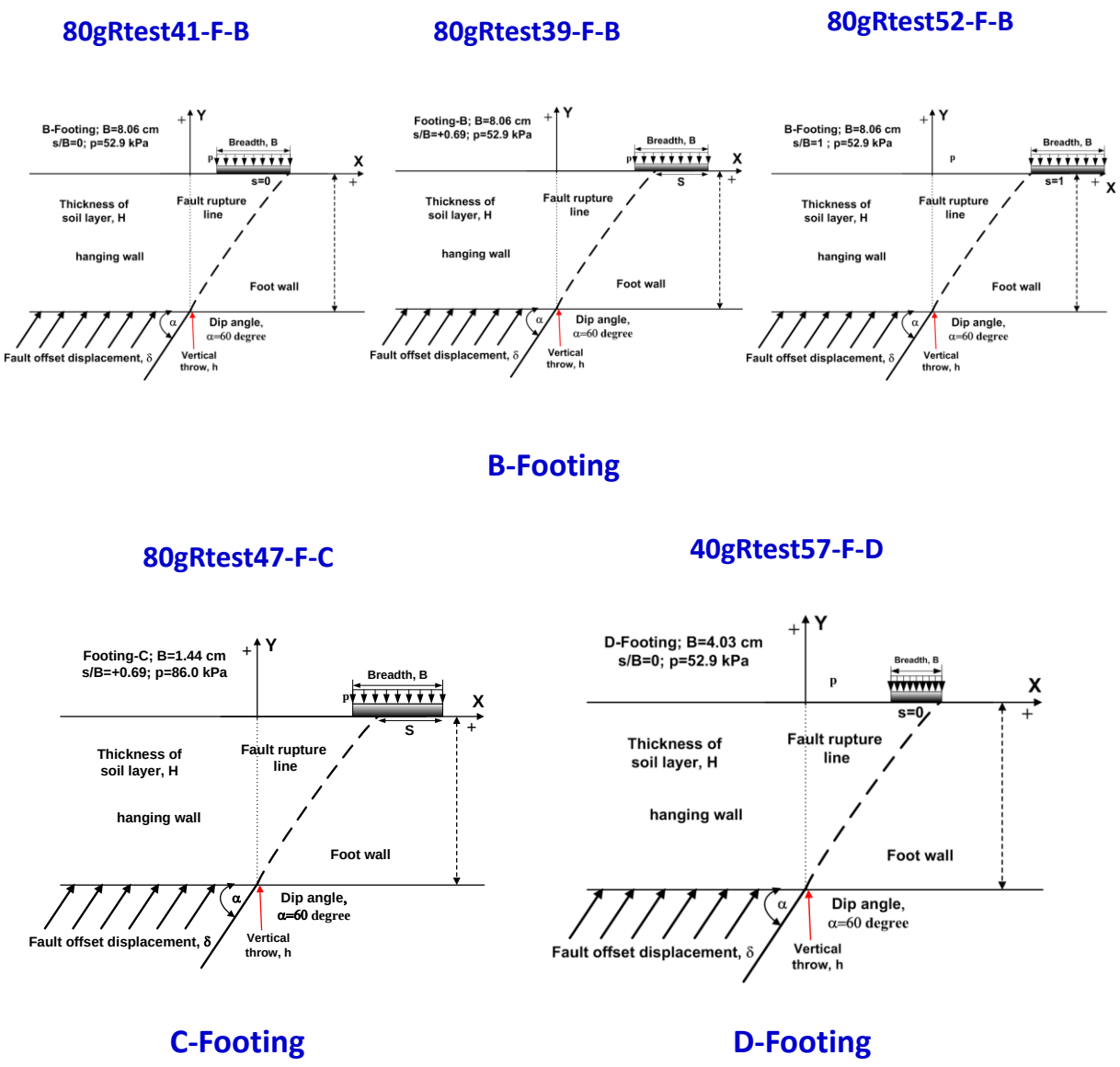


圖 3.2.10 不同試驗，剛性淺基礎版與逆斷層跡出露地表相對位置關係示意圖

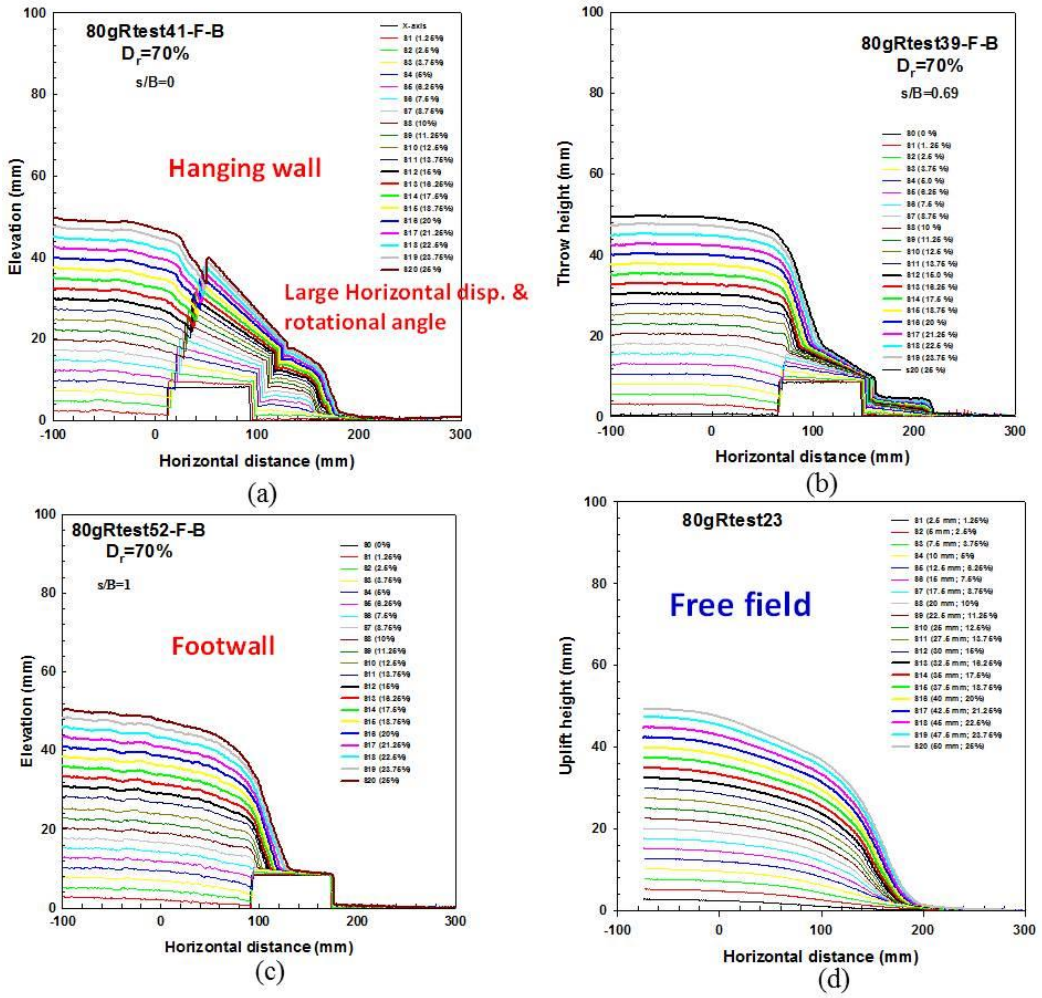


圖 3.2.11 逆斷層試驗不同垂直錯動量，B 基礎版在不同 s/B 的情況下，地表變形剖面之比較。(a)s/B=0；(b)s/B=0.69；(c)s/B=1；(d)自由場

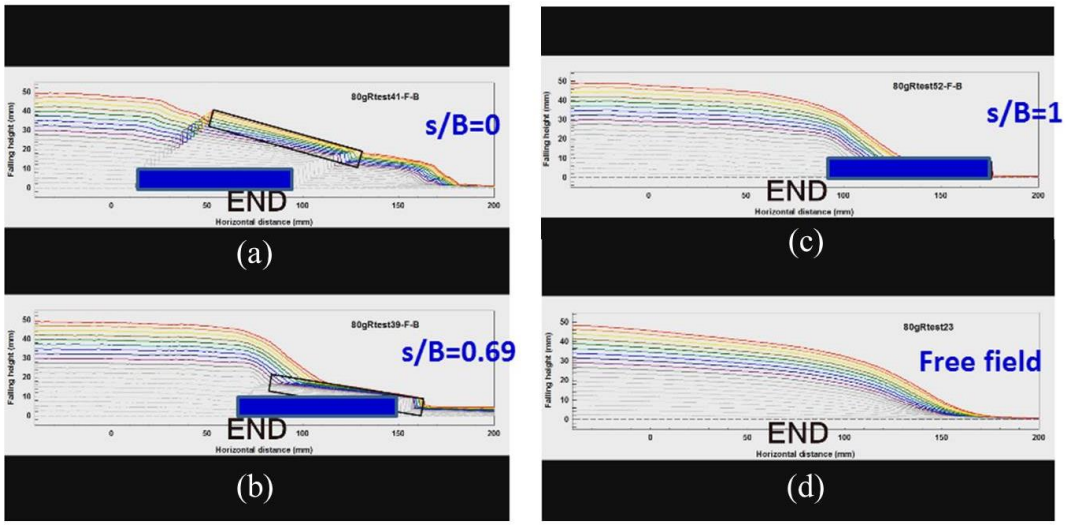
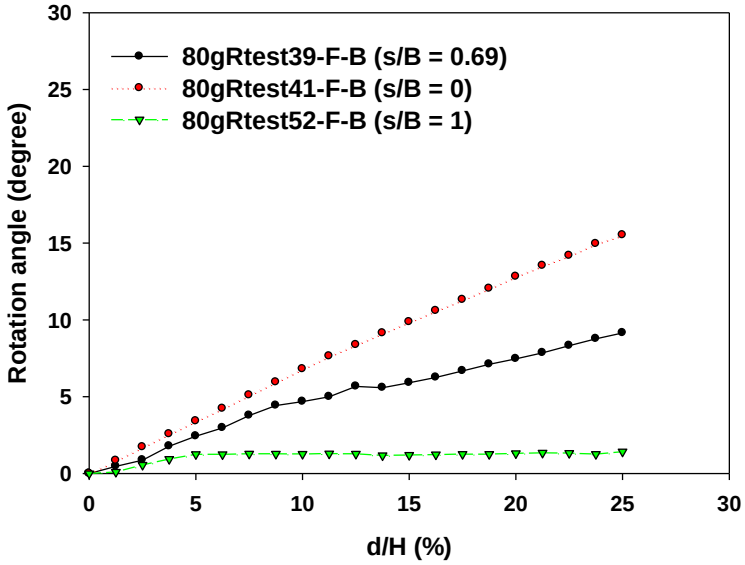
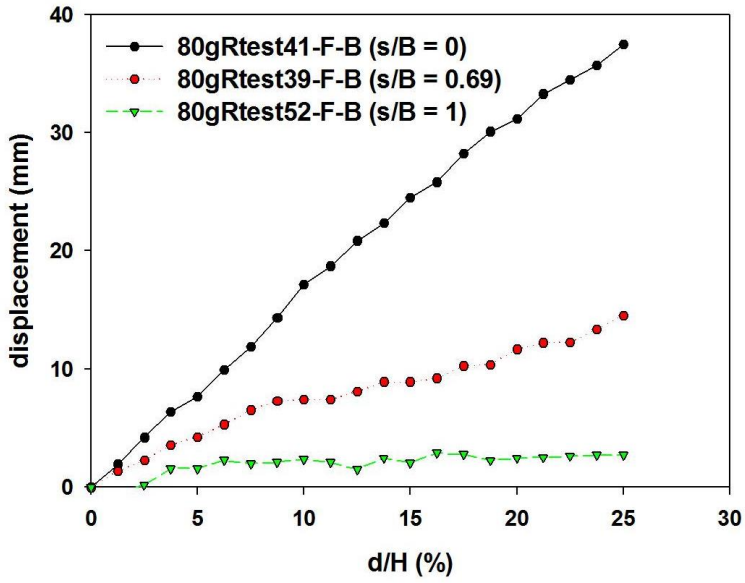


圖 3.2.12 逆斷層試驗不同垂直錯動量，B 基礎版在不同 s/B 情況下，地表變形剖面之比較。(a)s/B=0；(b)s/B=0.69；(c)s/B=1；(d)自由場



(a)



(b)

圖 3.2.13 逆斷層試驗不同垂直錯動量，B 基礎版在不同 s/B 情況下，基礎版旋轉角及水平變位之比較。(a)旋轉角；(b)水平變位



(a)



(b)

圖 3.2.14 921 集集地震建築物受到逆斷層錯動土壤被頂升至二層樓高之景象

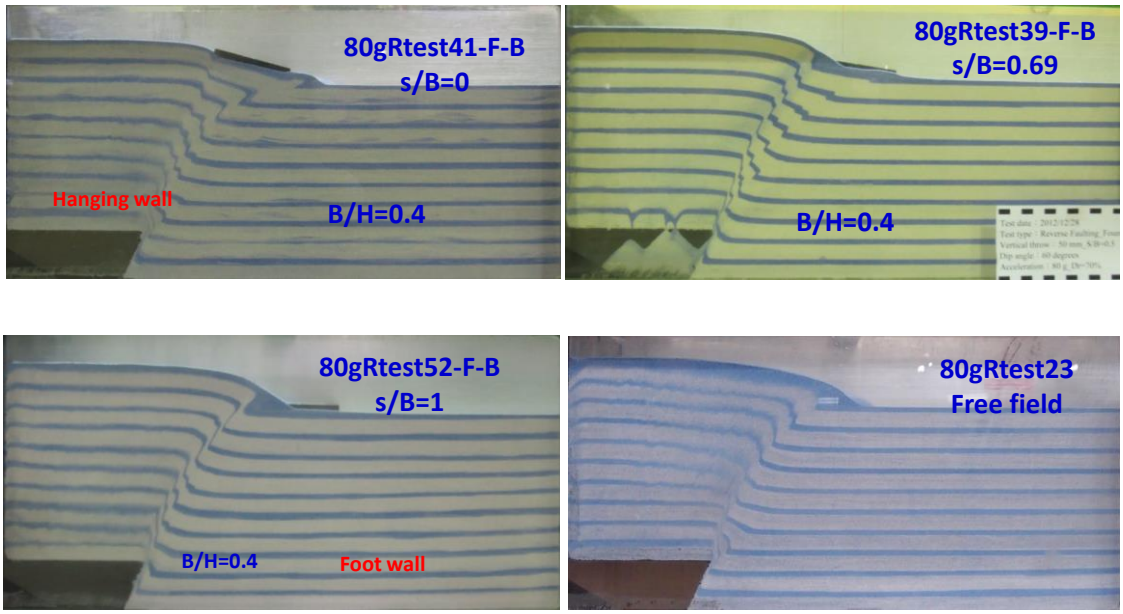


圖 3.2.15 逆斷層試驗，B 基礎版在不同 s/B 情況下，比較淺基礎版對斷層跡出露地表位置及破裂範圍。(a)s/B=0；(b)s/B=0.69；(c)s/B=1；(d)自由場

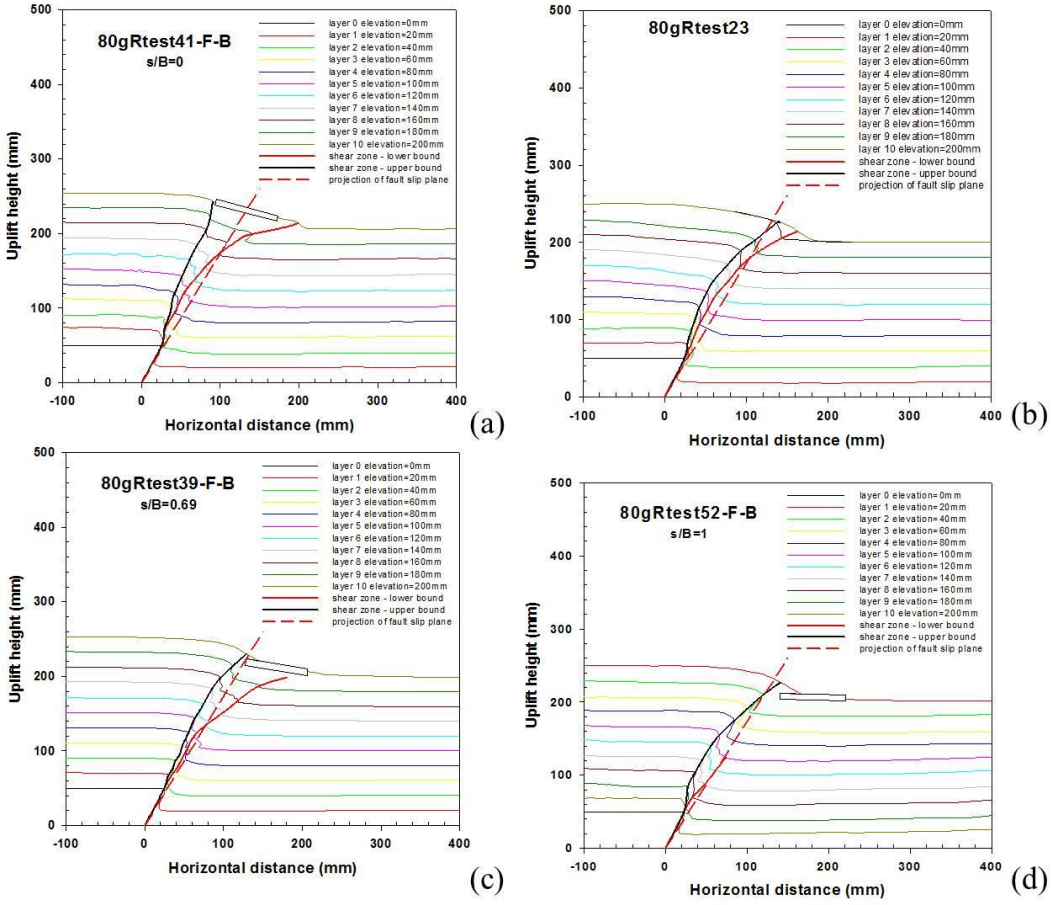


圖 3.2.16 逆斷層試驗，B 基礎版在不同 s/B 情況下，比較淺基礎版對斷層跡出露地表位置及破裂範圍。(a)s/B=0；(b)自由場；(c)s/B=0.69；(d)s/B=1

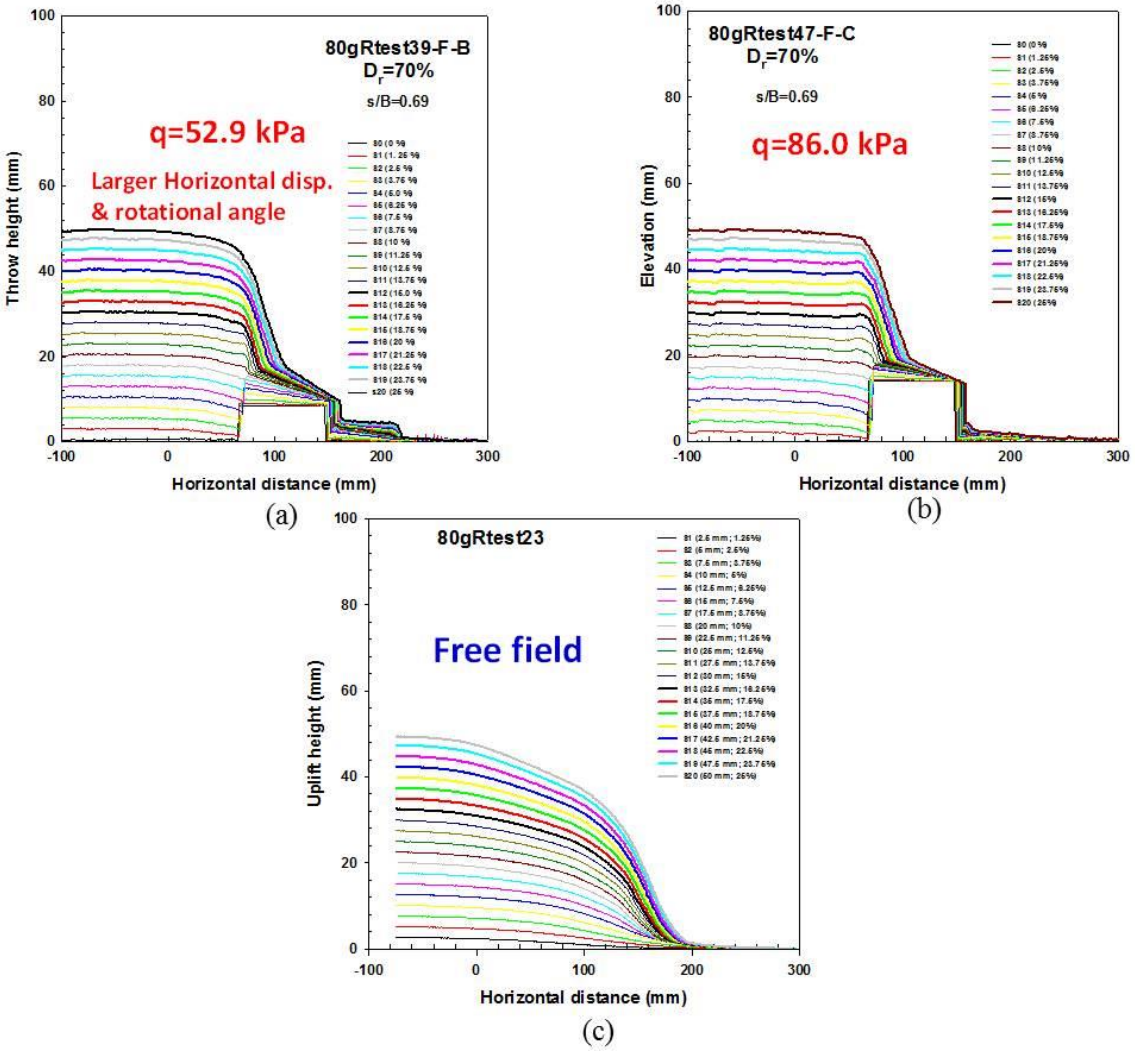


圖 3.2.17 逆斷層試驗不同垂直錯動量，不同載重基礎版相同 s/B=0.69 情況下，地表變形剖面之比較。(a)B 基礎(q=52.9kPa)；(b)C 基礎(q=86.0kPa)；(c)自由場

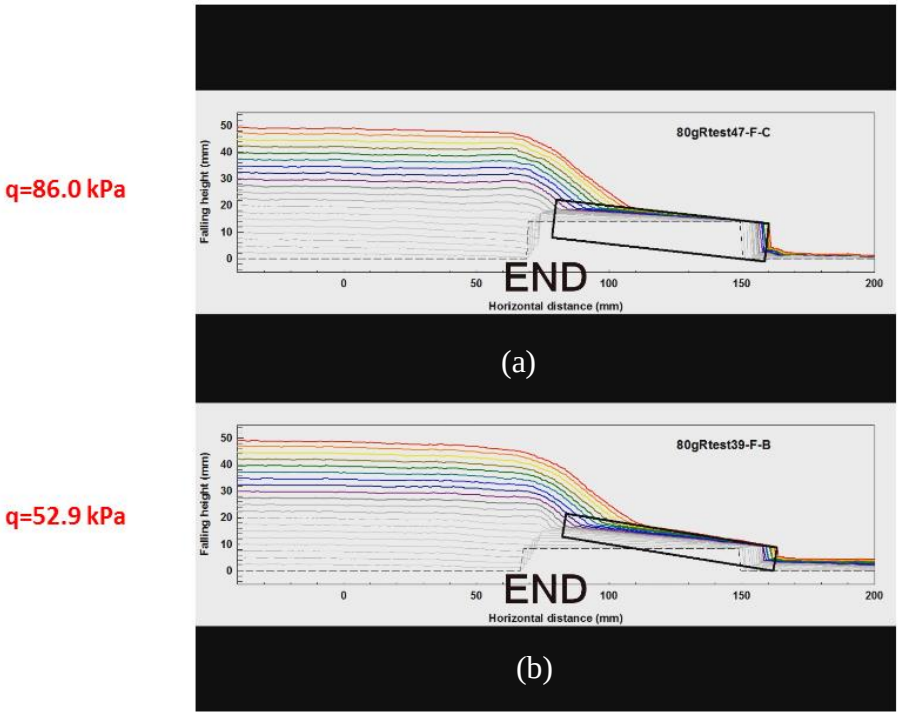
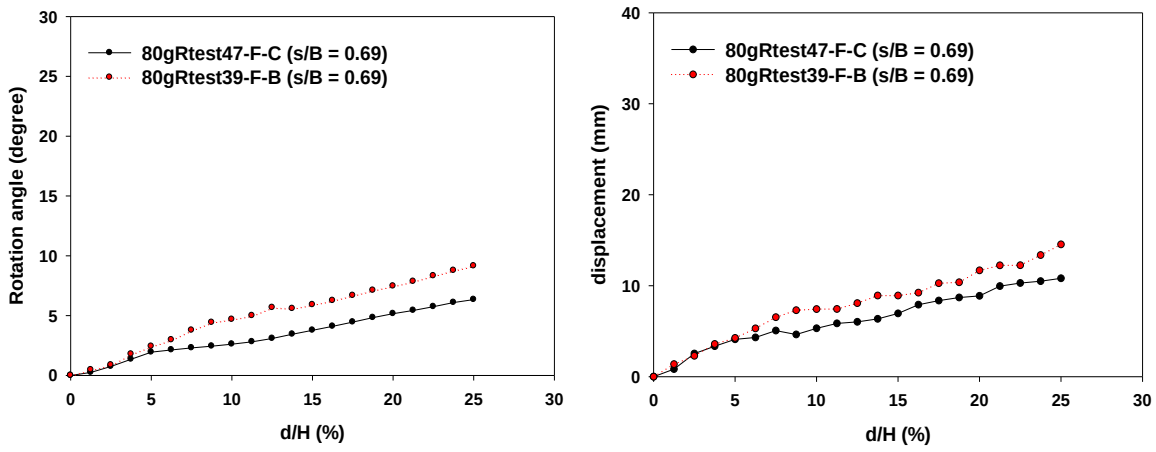
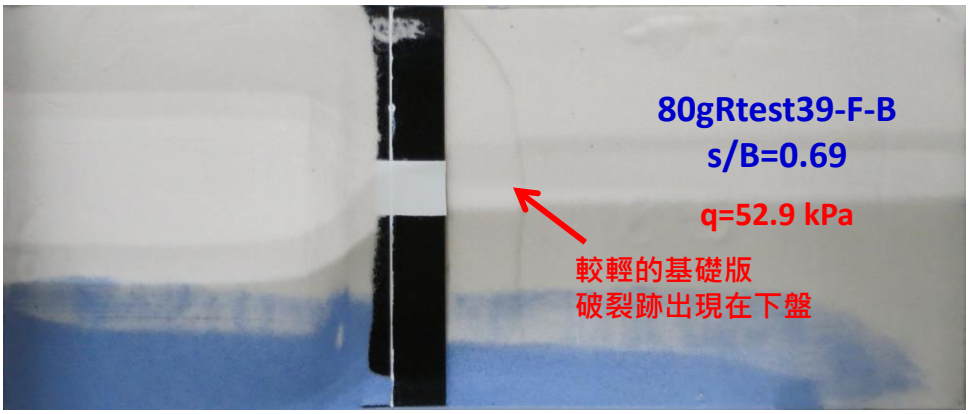


圖 3.2.18 逆斷層試驗不同垂直錯動量，不同載重基礎版相同 s/B=0.69 情況下，地表變形剖面之比較。(a)B 基礎(q=86.0kPa)；(b)C 基礎(q=52.9kPa)

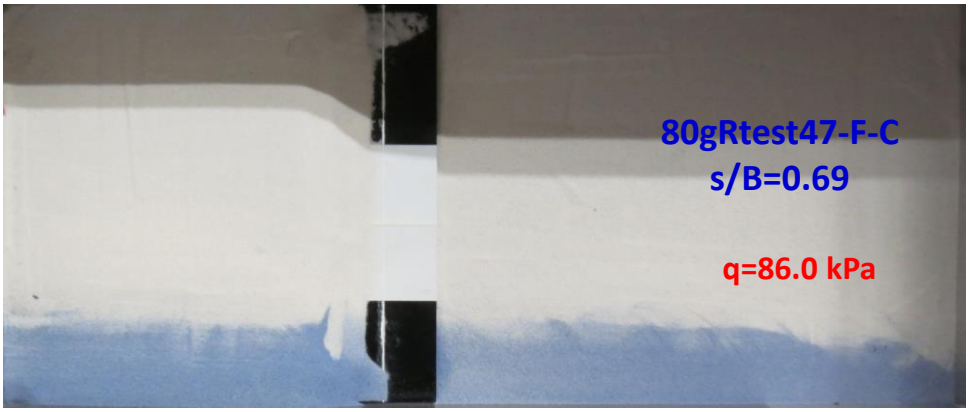


(a) (b)

圖 3.2.19 逆斷層試驗不同垂直錯動量，不同載重基礎版相同 s/B=0.69 情況下，基礎旋轉角及水平位移之比較。(a)基礎旋轉角；(b)基礎水平位移



(a)



(b)

圖 3.2.20 逆斷層試驗垂直錯動量 r=25%時，不同載重基礎版在相同 s/B=0.69 情況下，斷裂跡出露地表情形。(a)B 基礎(q=52.9kPa)；(b)C 基礎(q=86.0kPa)

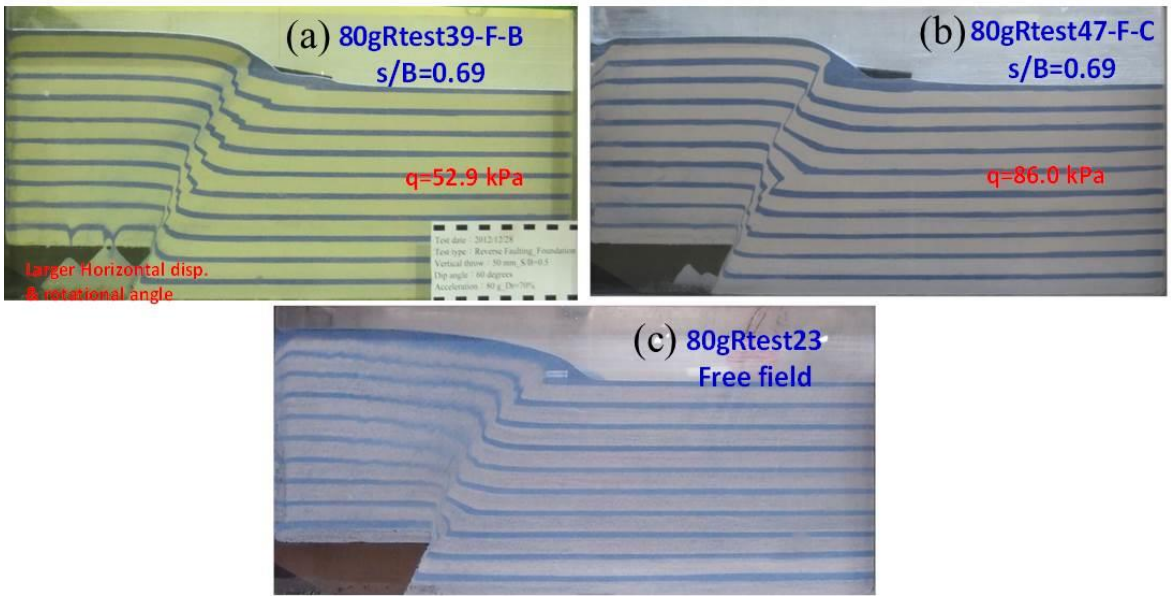


圖 3.2.21 逆斷層試驗在相同 s/B=0.69 情況下，不同載重淺基礎對斷層跡出露地表位置及破裂範圍比較。(a) q=52.9kPa；(b)q=86kPa；(c)自由場

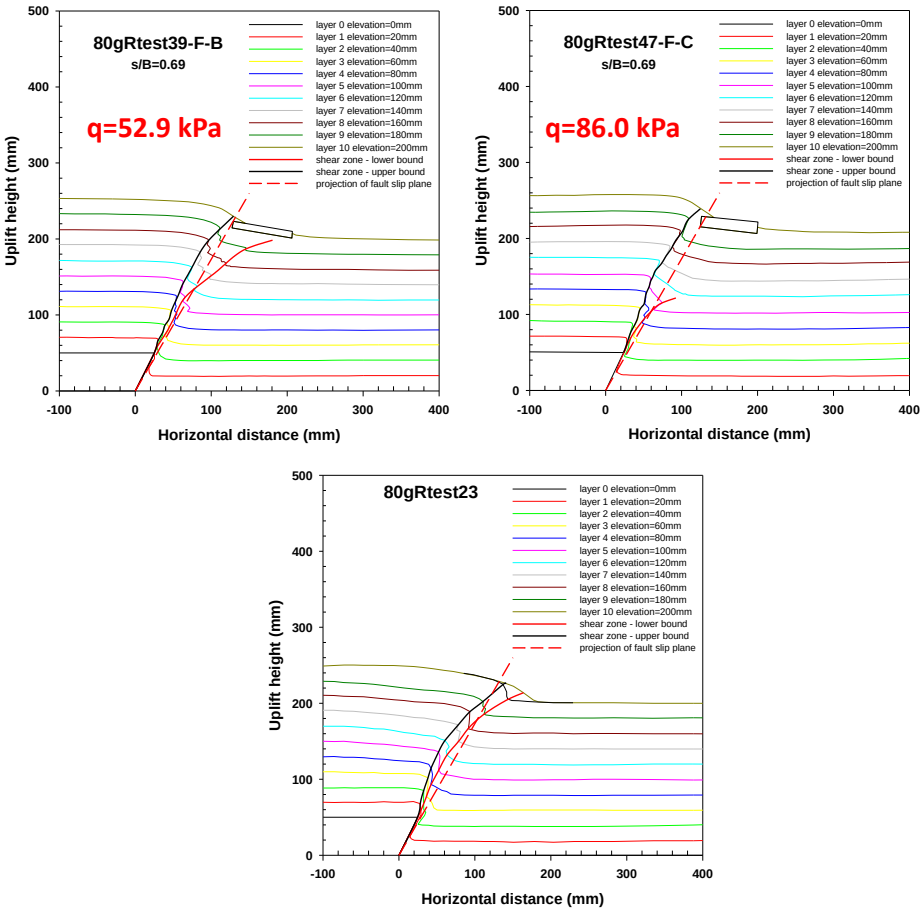


圖 3.2.22 逆斷層試驗在相同 s/B=0 情況下，不同載重淺基礎對斷層跡出露地表位置及破裂範圍比較。(a)q=52.9kPa；(b)q=86.0kPa；(c)自由場

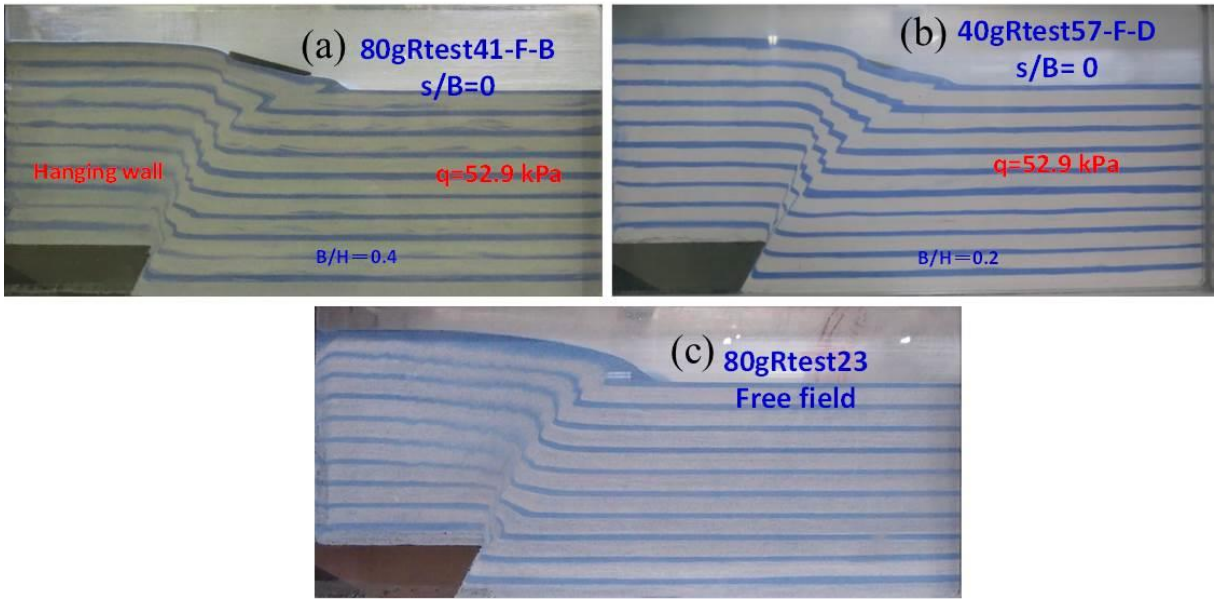


圖 3.2.23 逆斷層試驗在相同 s/B=0 情況下，不同寬度淺基礎版對斷層跡出露地表位置及破裂範圍比較。(a)8.06cm；(b)4.03cm；(c)自由場

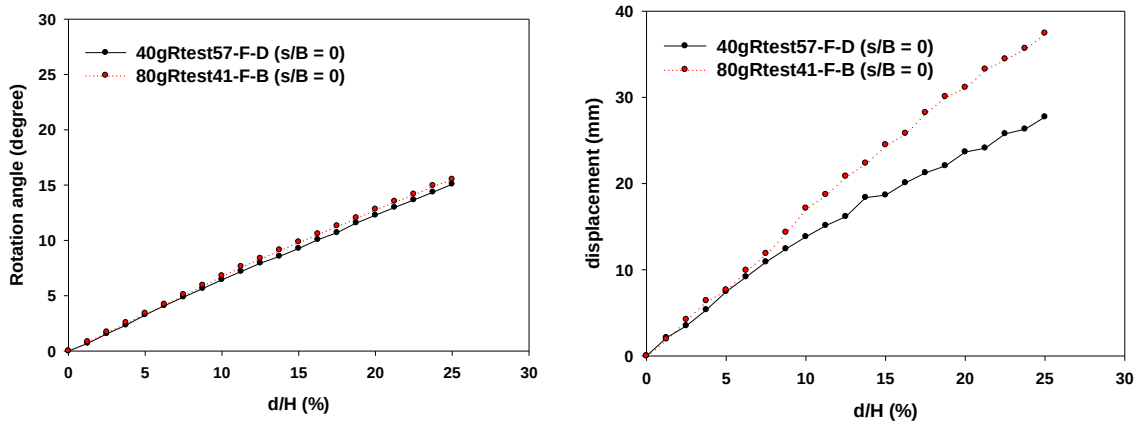


圖 3.2.24 逆斷層試驗在相同 s/B=0 情況下，不同寬度的淺基礎版旋轉角、水平位移之比較。(a)旋轉角；(b)水平位移

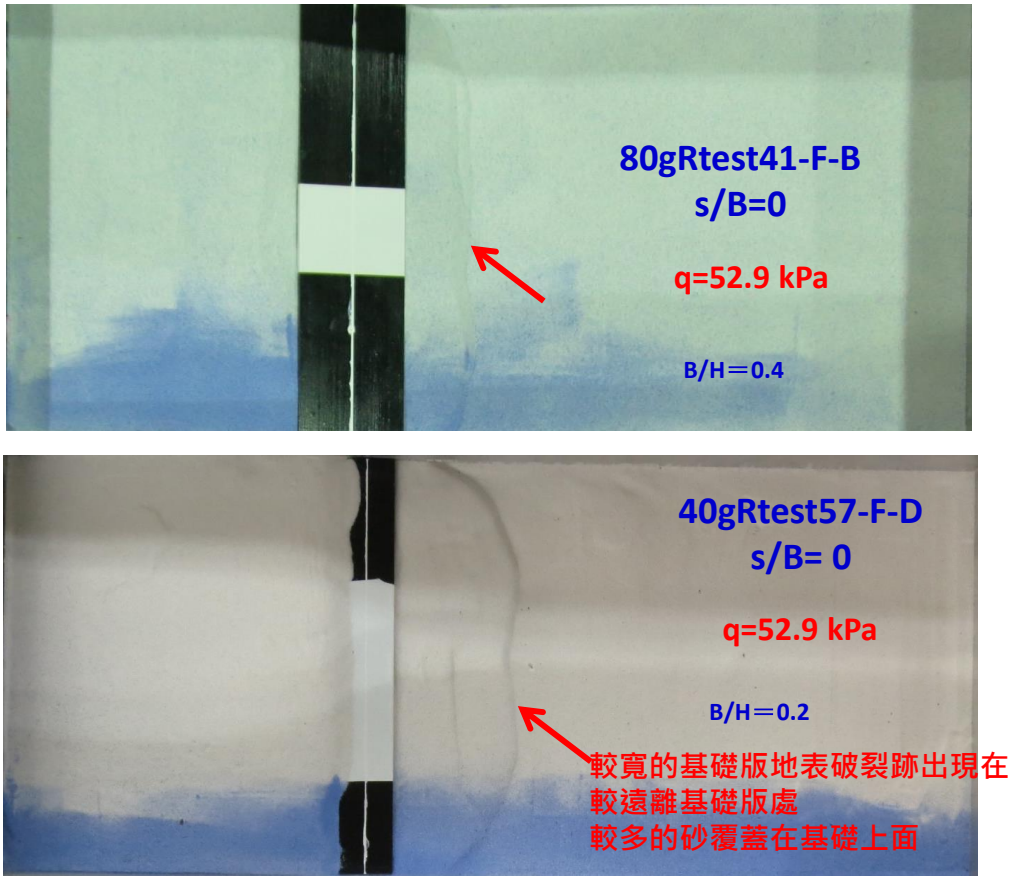


圖 3.2.25 逆斷層試驗，在相同 s/B=0 及相同載重情況下，不同寬度的淺基礎版試驗後地表面斷層跡出露景象的比較

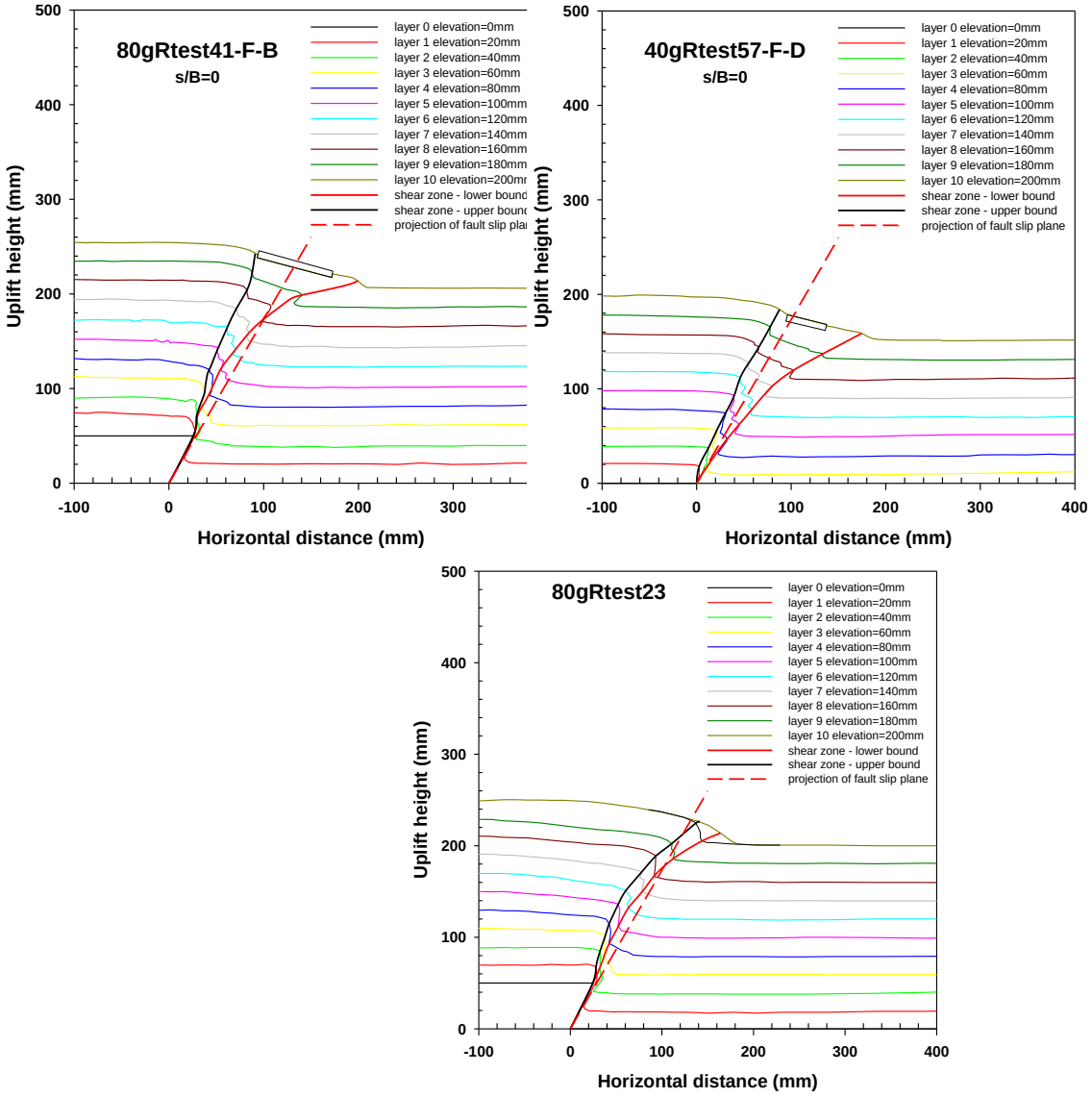


圖 3.2.26 逆斷層試驗，在相同 s/B=0 及相同載重情況下，不同寬度的淺基礎版試驗後及自由場地下斷層跡出露景象的比較

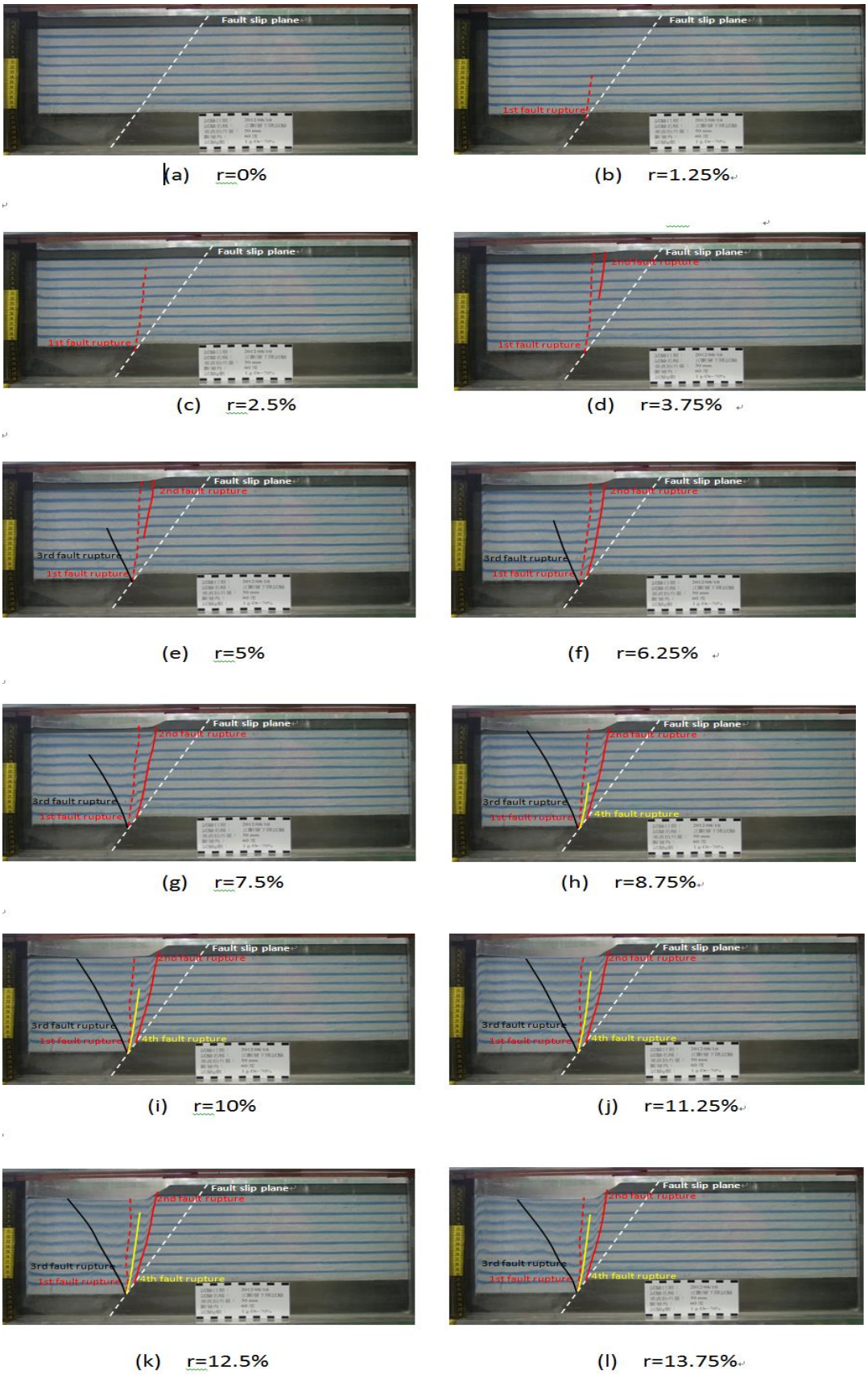
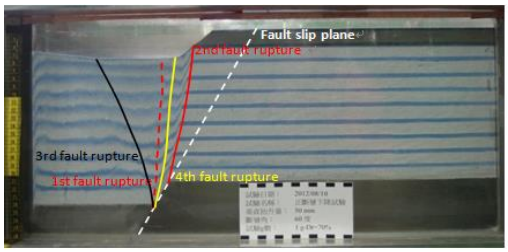
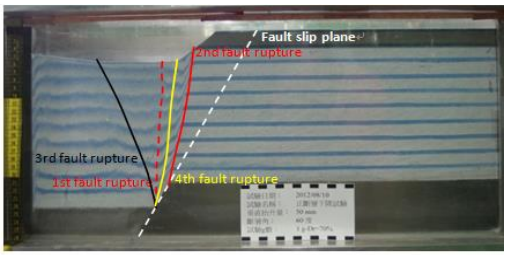


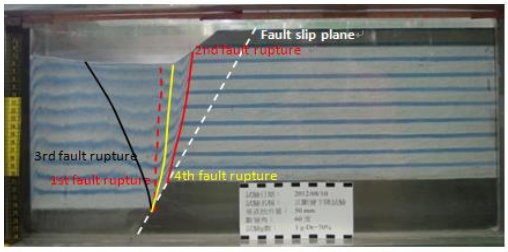
圖 3.2.27 1g 試驗條件下正斷層錯動時破裂跡之發展及演化



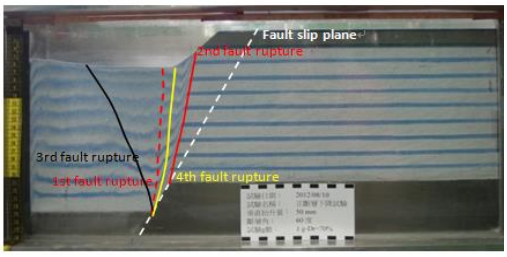
(m) r=15%



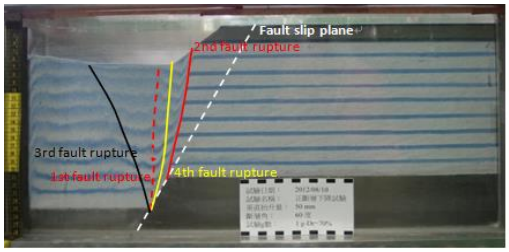
(n) r=16.25%



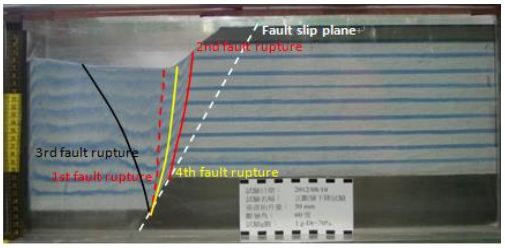
(o) r=17.5%



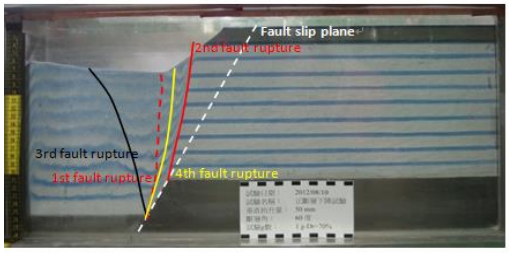
(p) r=18.75%



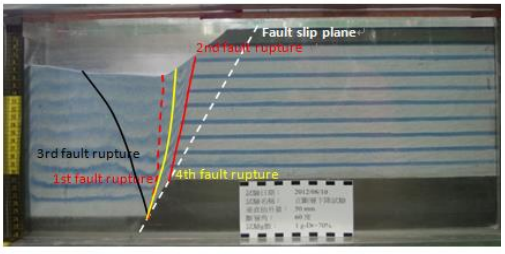
(q) r=20%



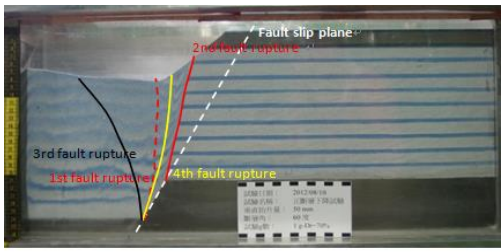
(r) r=21.25%



(s) r=22.5%



(t) r=23.75%



(u) r=25%

圖 3.2.27 1g 試驗條件下正斷層錯動時破裂跡之發展及演化(續)

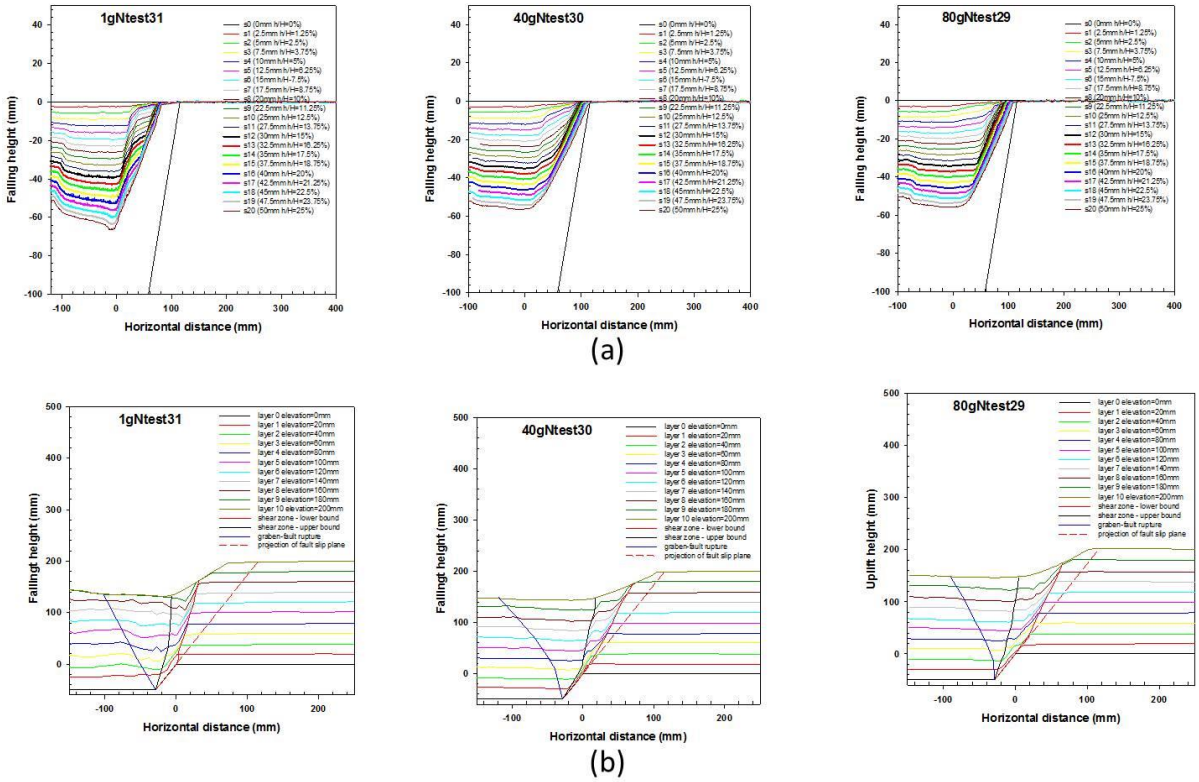


圖 3.2.28 正斷層錯動時在不同垂直錯動量下地表變位剖面及地下破裂跡。(a)不同 g 值下，不同垂直錯動量下地表變位剖面；(b)不同 g 值下，垂直錯動量 r=25%時，地下破裂跡之發展及演化

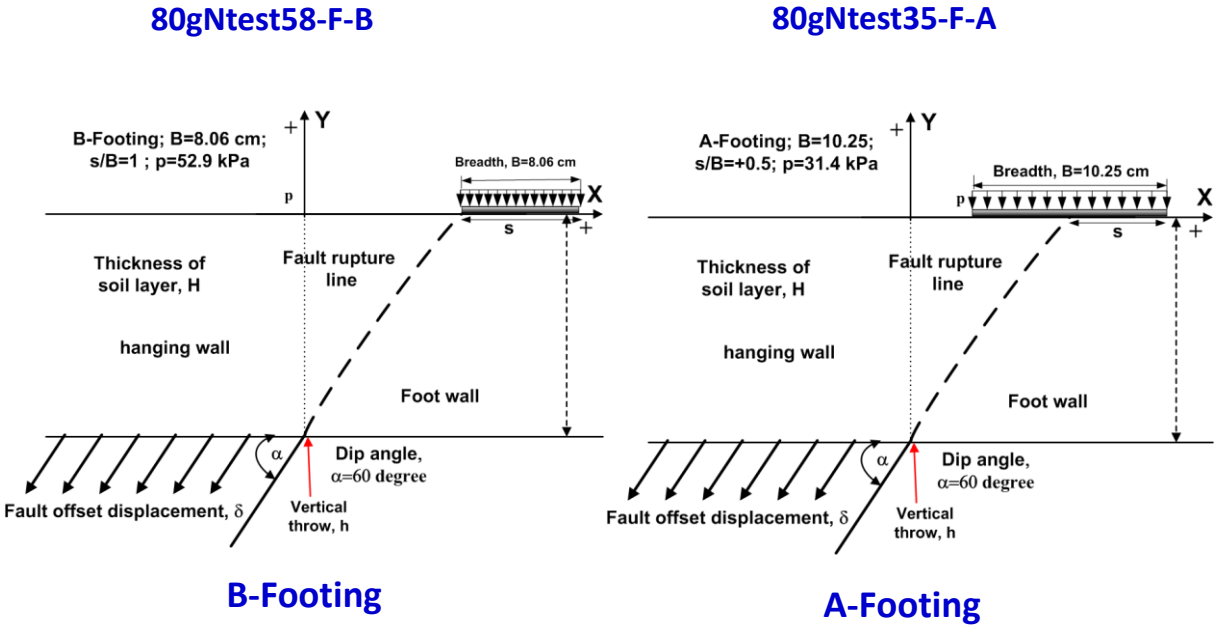


圖 3.2.29 不同試驗，剛性淺基礎版與正斷層跡出露地表相對位置關係示意圖

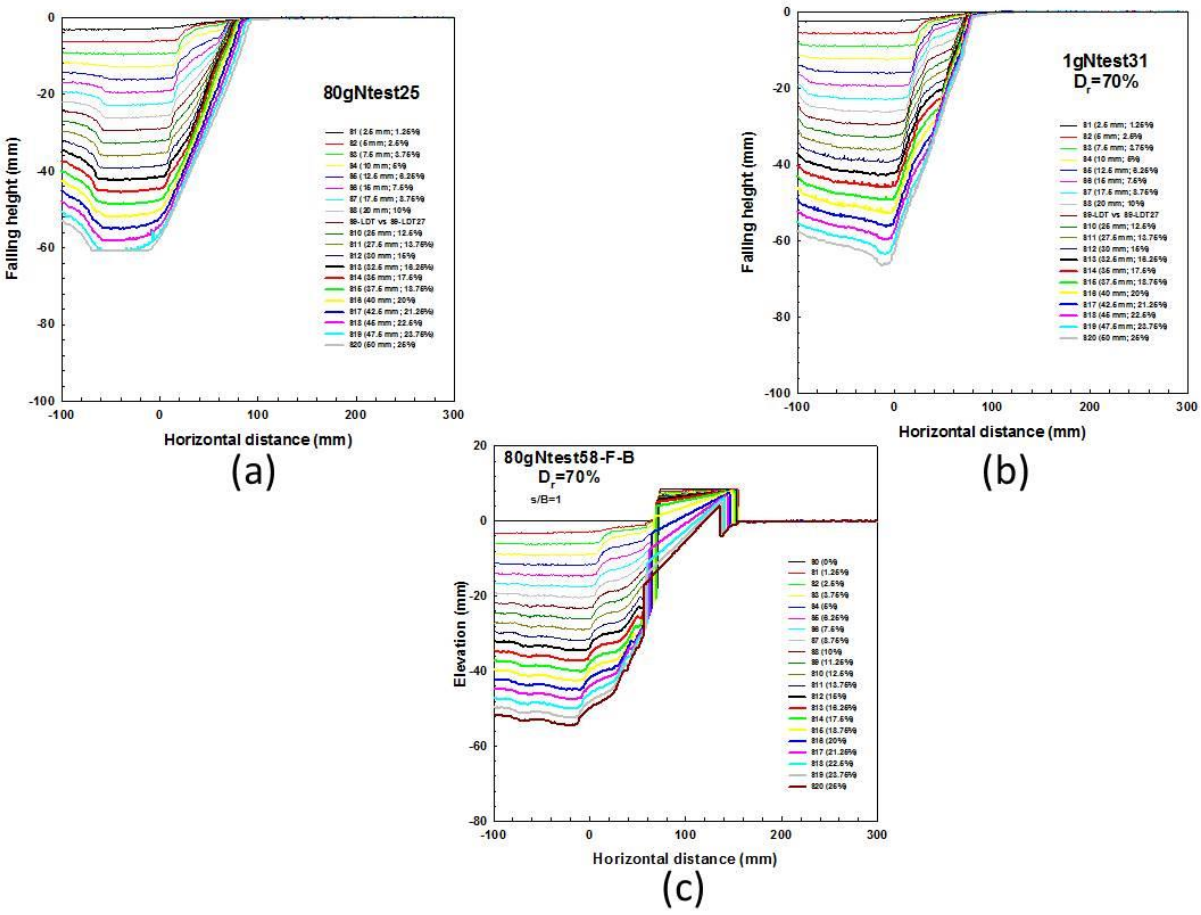


圖 3.2.30 為正斷層錯動試驗不同垂直錯動量，自由場(1g 及 80g 情況下)及 B 基礎版在 s/B=1 情況下，地表變形剖面之比較。(a)80g 自由場；(b)1g 自由場；(c)s/B=1

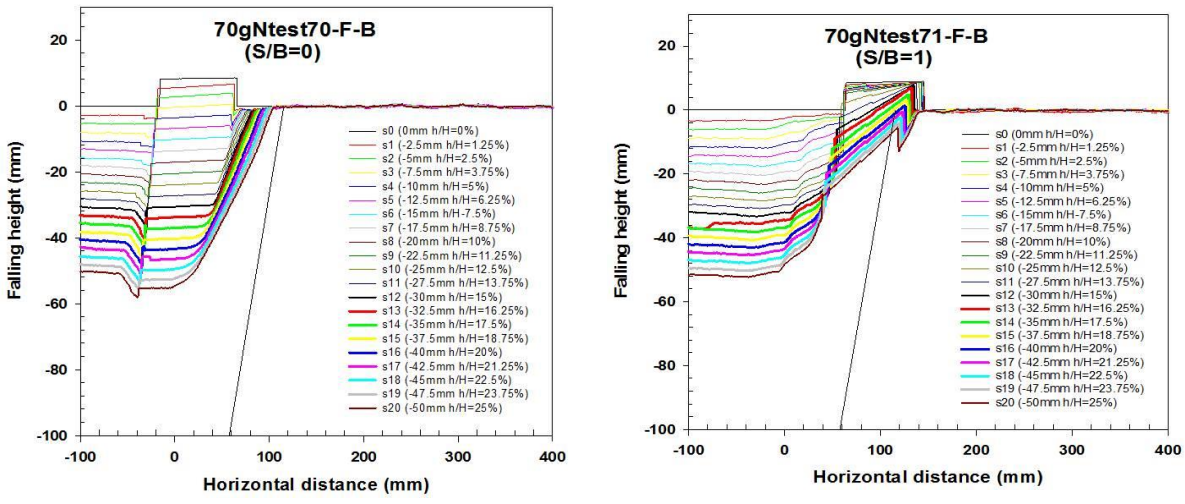


圖 3.2.31 正斷層錯動試驗不同垂直錯動量，B 基礎版在 s/B=0 及 s/B=1 處，地表變形剖面之比較

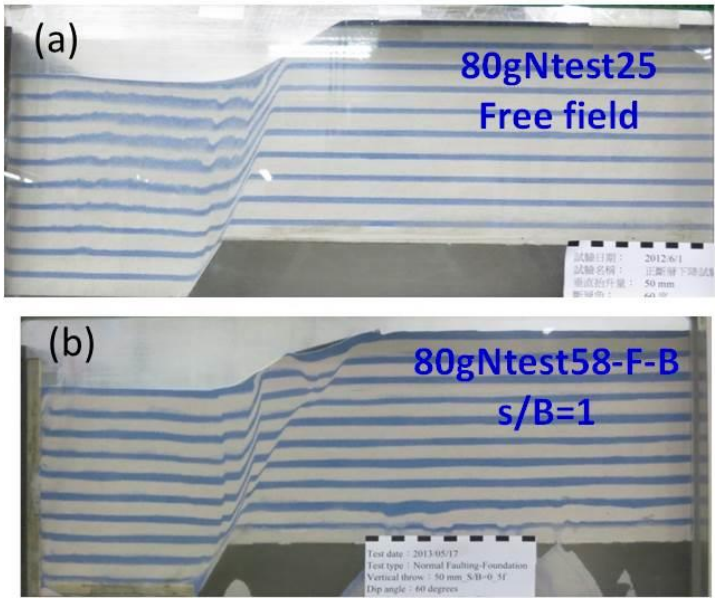
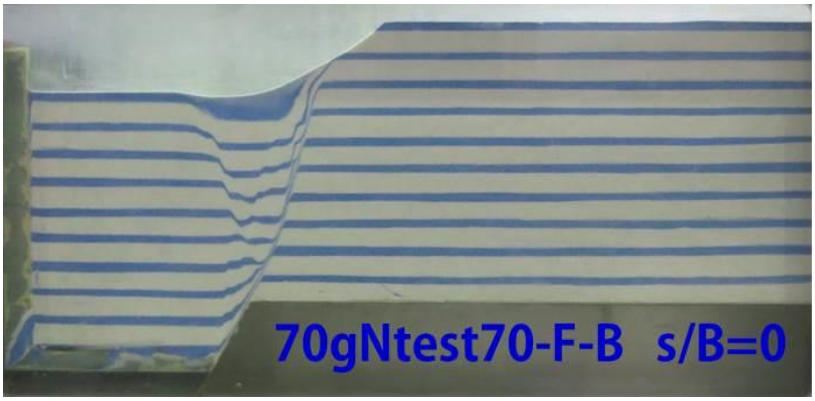


圖 3.2.32 正斷層垂直錯動 5cm，自由場及 B 基礎版位於 s/B=1 處，地下破裂跡的比較。

(a)自由場(b)s/B=1



(a)



(b)

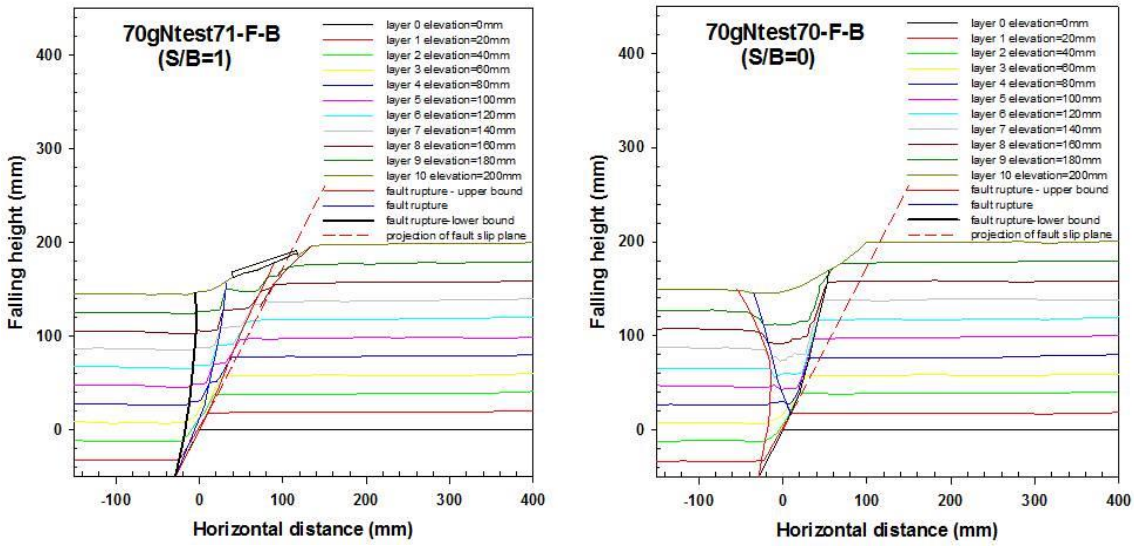
圖 3.2.33 正斷層(70g)垂直錯動 5cm，B 基礎版位於 s/B=0 處，地下破裂跡的比較。

(a)s/B=0(b)自由場



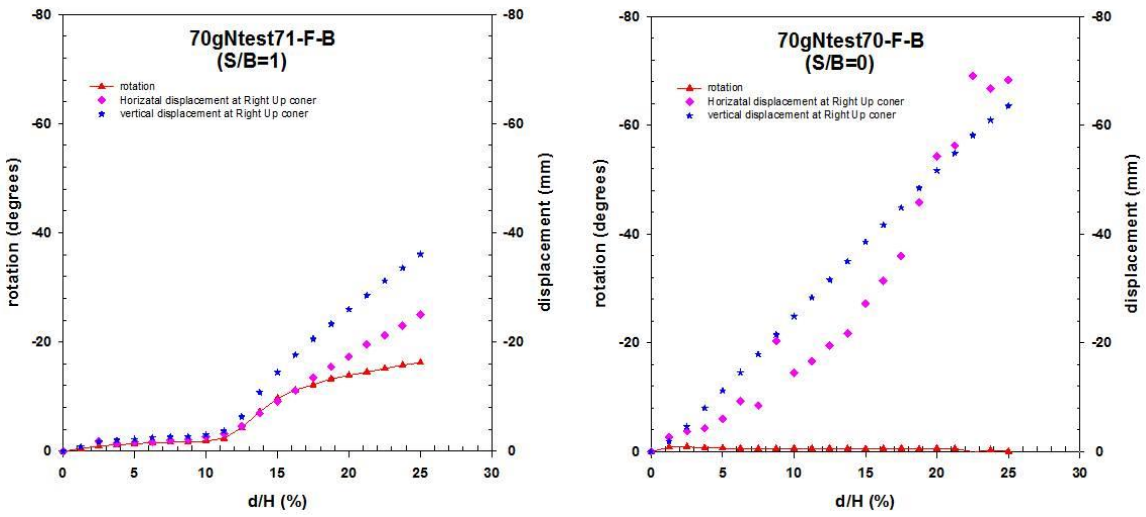
圖 3.2.34 正斷層(70g)垂直錯動 5cm，B 基礎版位於 s/B=1 處，地下破裂跡的比較。

(a)s/B=1(b)自由場



(a) (b)

圖 3.2.35 正斷層(70g)垂直錯動量 5cm 後，B 基礎版座落於 s/B=0 及 s/B=1 處，地下破裂跡的比較。(a)s/B=1；(b)s/B=0



(a) (b)

圖 3.2.36 正斷層(70g)不同垂直錯動量下，B 基礎版座落於 s/B=0 及 s/B=1 處，旋轉角水平位移及垂直位移之比較。(a)s/B=1；(b)s/B=0

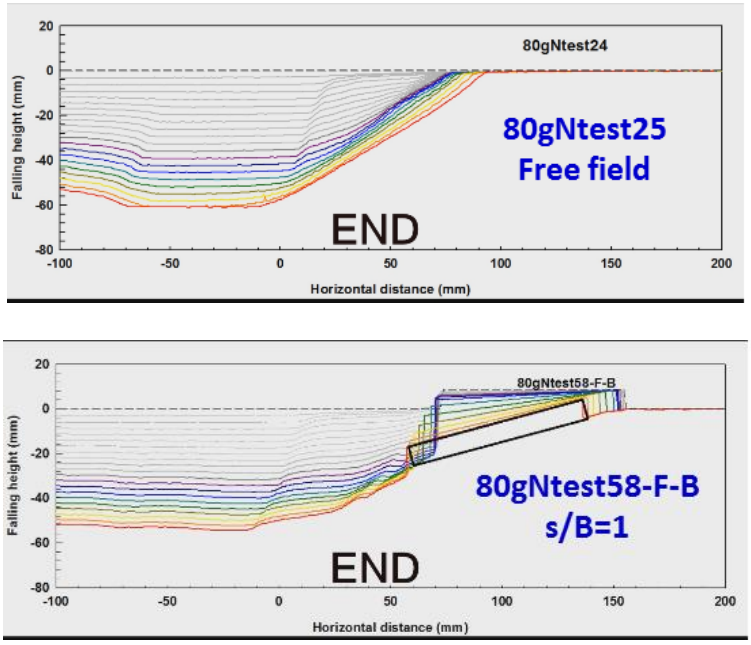
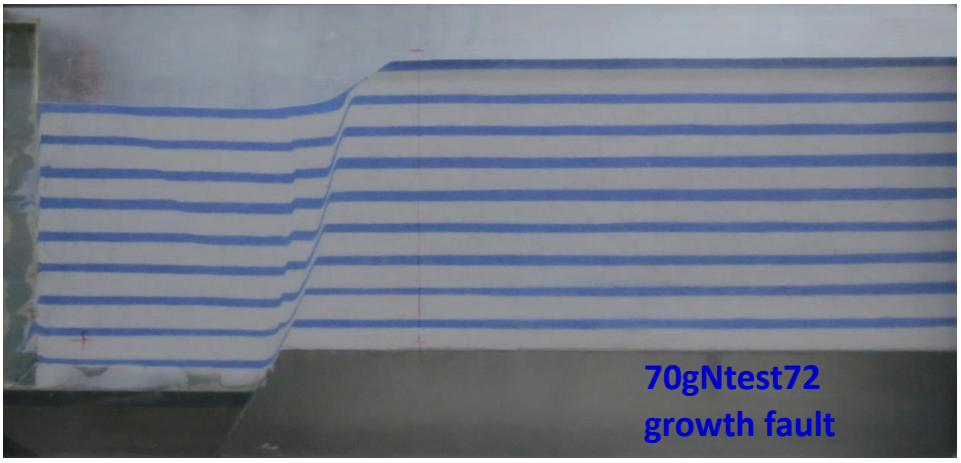


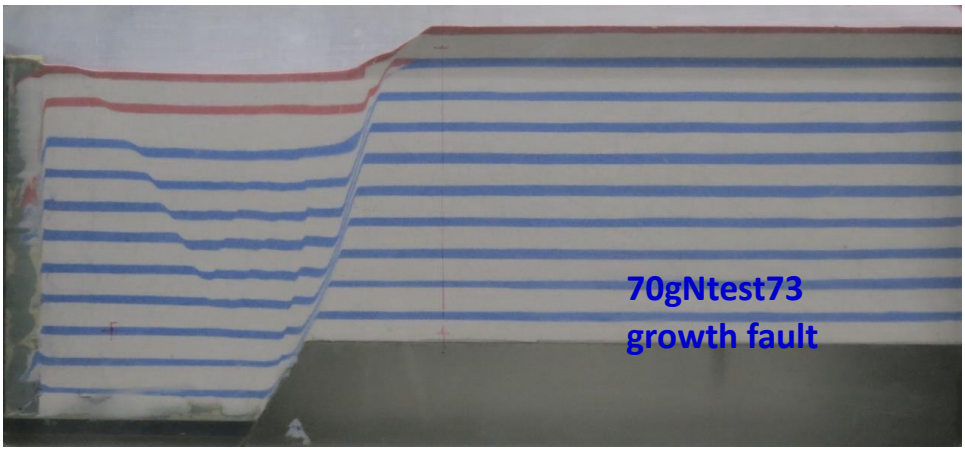
圖 3.2.37 正斷層在不同垂直錯動量，自由場及 B 基礎版座落於 s/B=1 處，地表變位剖面與基礎版傾斜及位移的情形地下破裂跡的比較



(a)

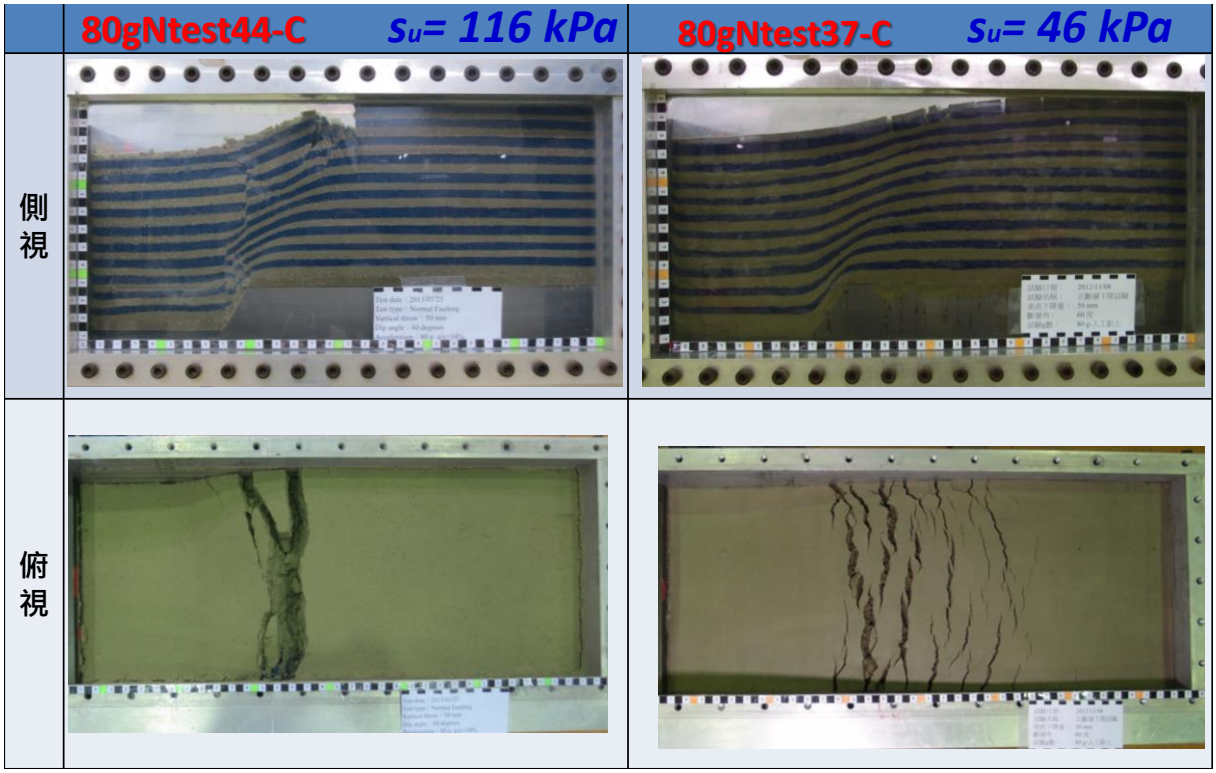


(b)



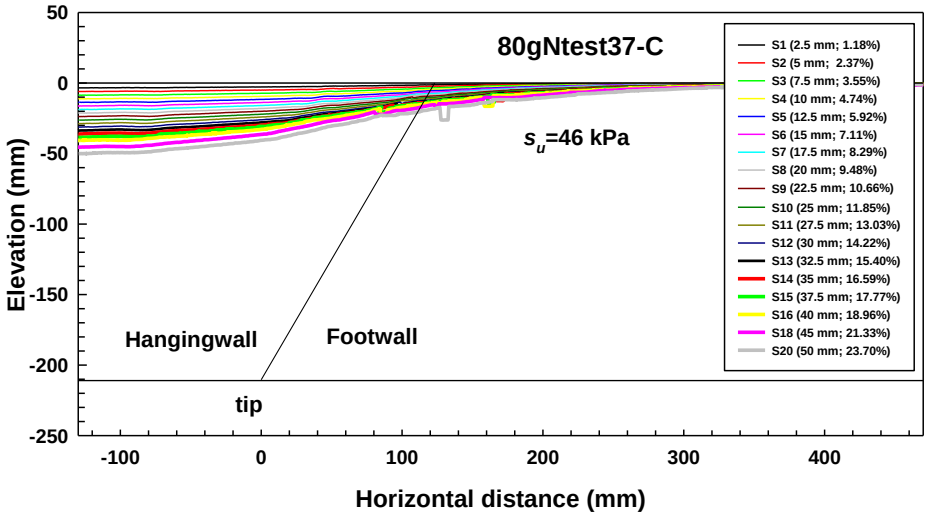
(c)

圖 3.2.38 生長斷層與非生長斷層破裂跡之比較(a)非生長斷層(b)生長斷層第一階段(c)一層生長斷層

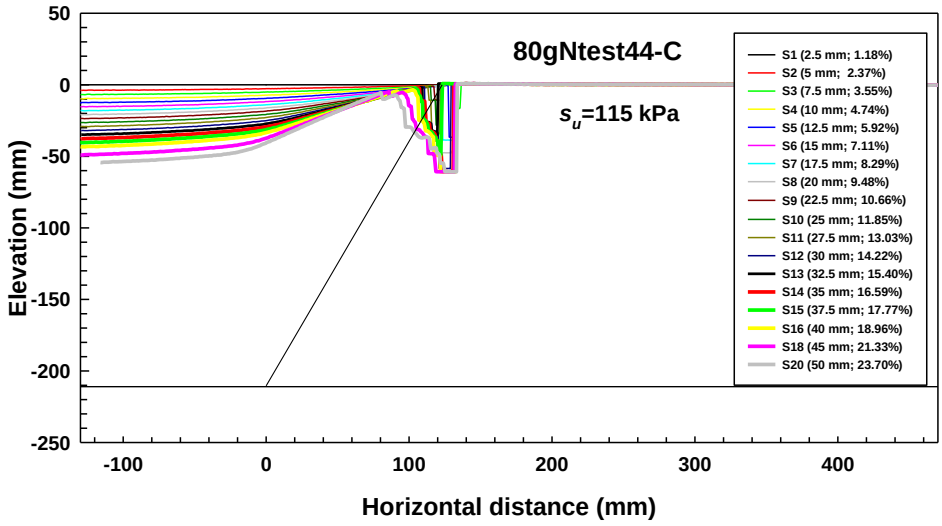


(a) (b)

圖 3.2.39 不同剪力強度純黏土試體正斷層錯動試驗結果比較。(a)純黏土試體不排水剪力強度 su=115kPa；(b)純黏土試體不排水剪力強度 su=46kPa

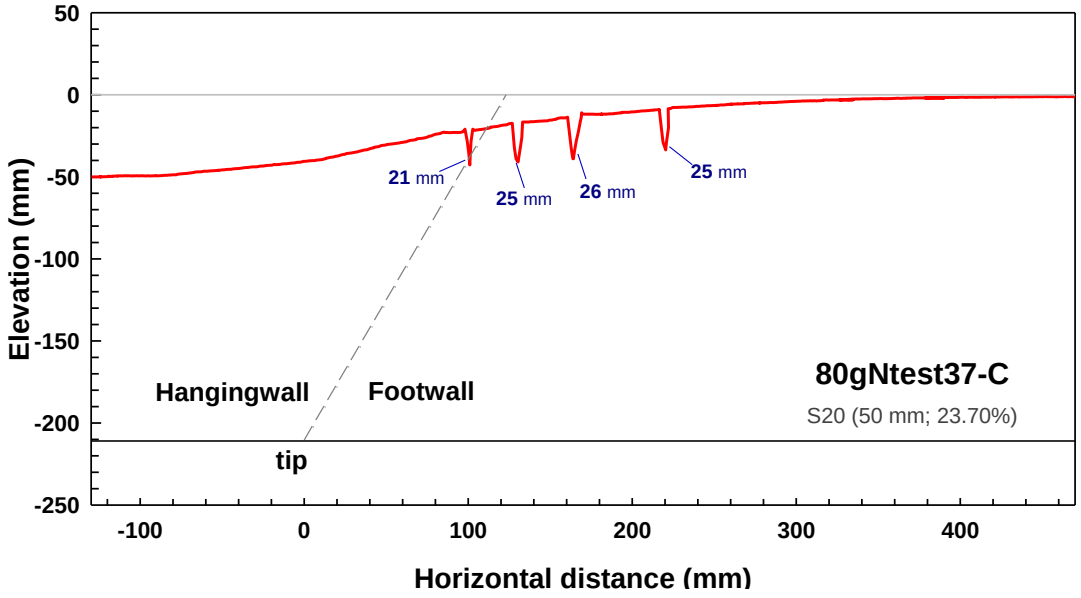


(a)

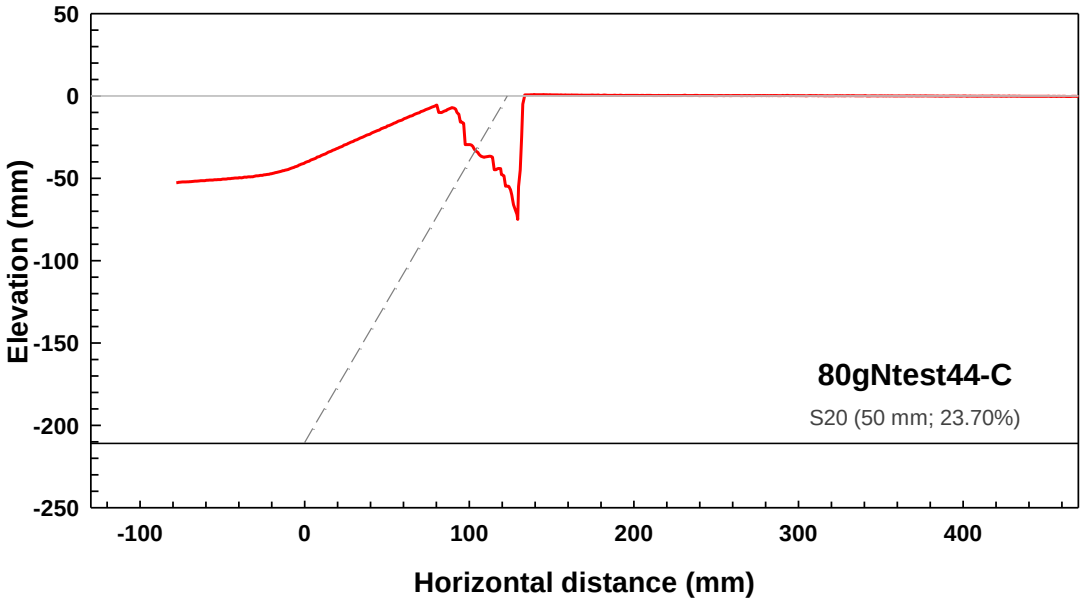


(b)

圖 3.2.40 不同剪力強度純黏土試體正斷層錯動試驗，地表剖面結果比較。(a)純黏土試體不排水剪力強度 su=115kPa；(b)純黏土試體不排水剪力強度 su=46kPa

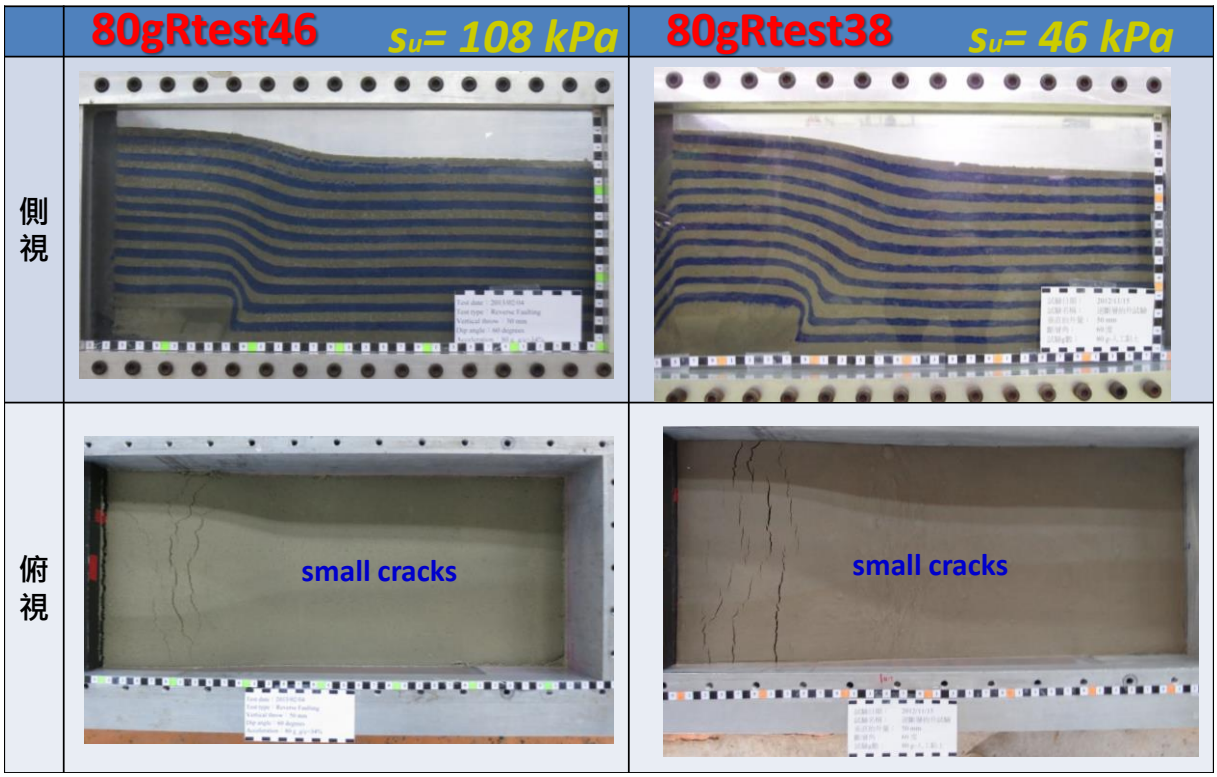


(a)



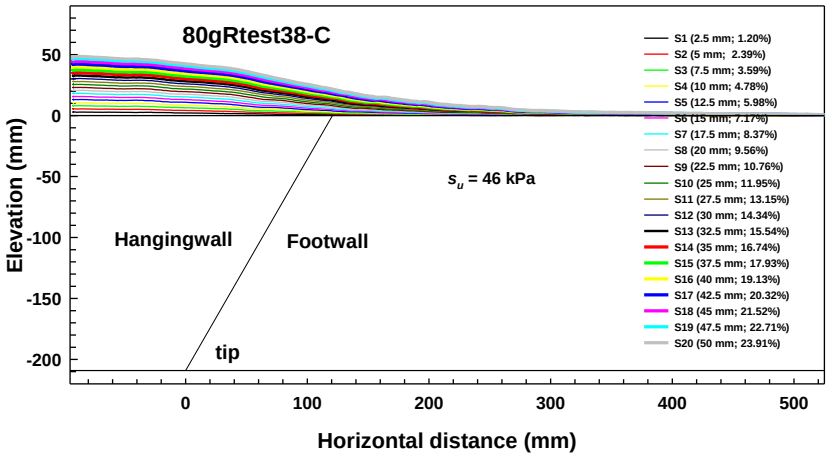
(b)

圖 3.2.41 不同剪力強度純黏土試體正斷層錯動試驗，地表剖面結果比較。(a)純黏土試體不排水剪力強度 su=46kPa；(b)純黏土試體不排水剪力強度 su=115kPa

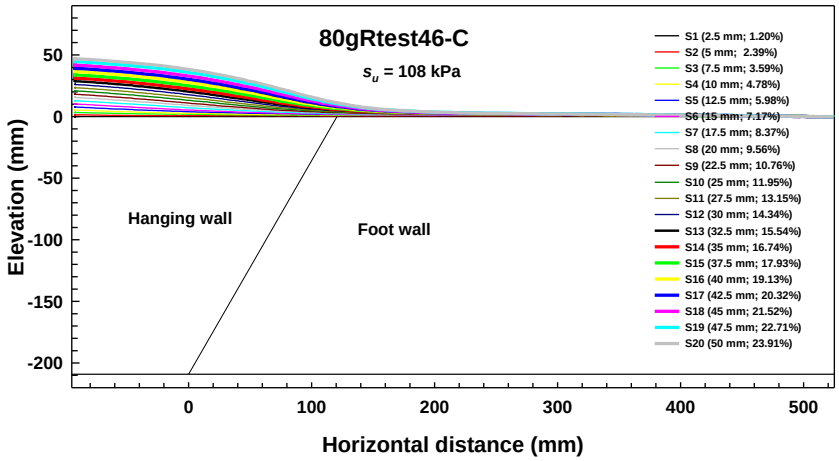


(a) (b)

圖 3.2.42 不同剪力強度純黏土試體逆斷層錯動試驗結果比較：(a)純黏土試體不排水剪力強度 su=108kPa；(b)純黏土試體不排水剪力強度 su=46kPa



(a)



(b)

圖 3.2.43 不同剪力強度純黏土試體逆斷層錯動試驗，地表剖面結果比較：(a)純黏土試體不排水剪力強度 su=46kPa；(b)純黏土試體不排水剪力強度 su=108kPa

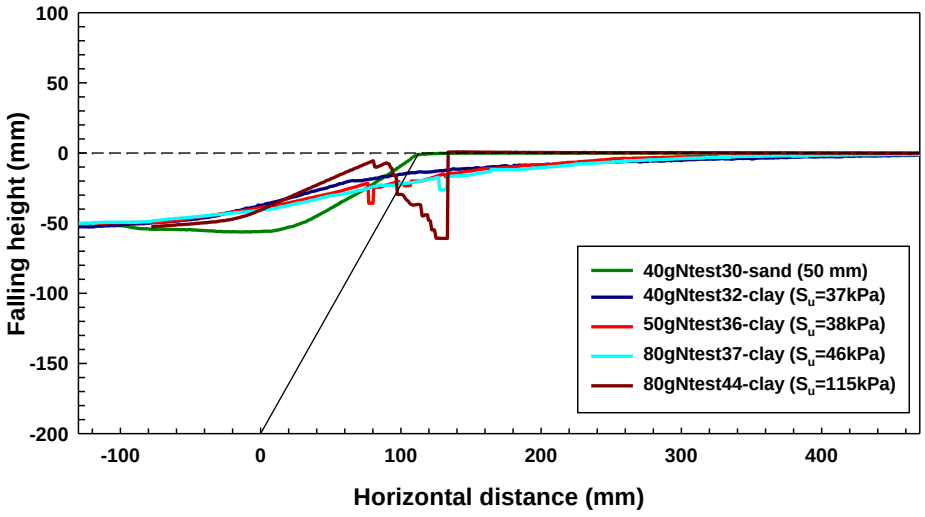


圖 3.2.44 不同剪力強度純黏土試體及砂試體正斷層錯動試驗，地表剖面結果之比較

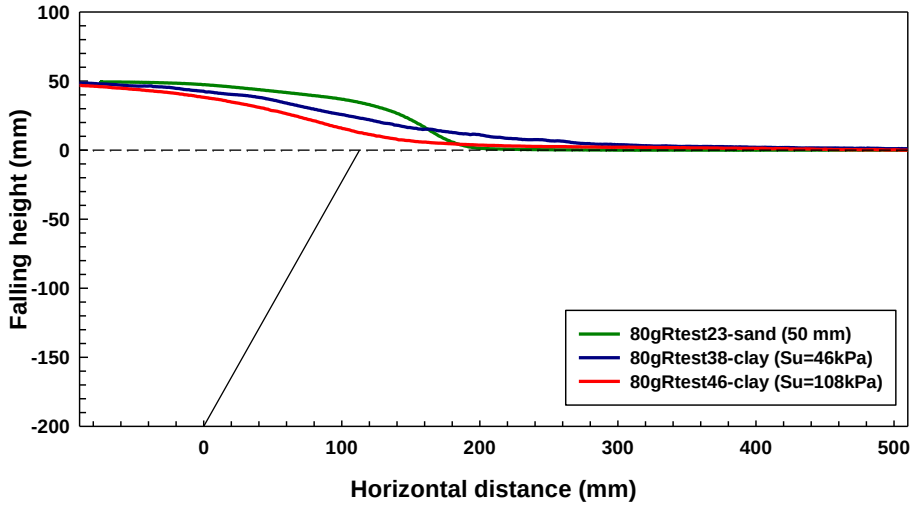
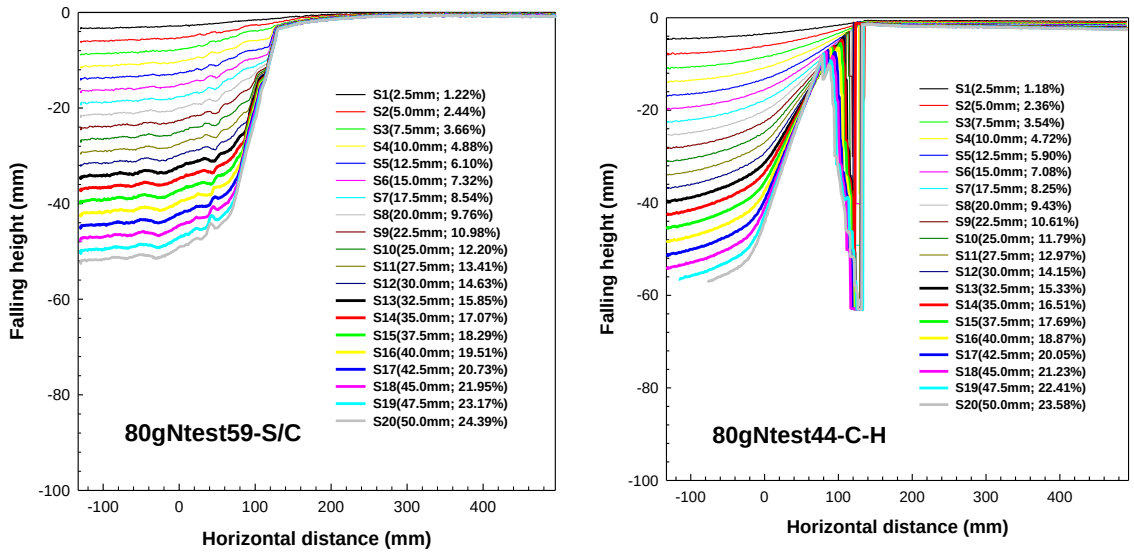


圖 3.2.45 不同剪力強度純黏土試體及砂試體逆斷層錯動試驗，地表剖面結果之比較



(a) (b)

圖 3.2.46 黏土砂土互層試體及純黏土試體，正斷層錯動試驗，地表剖面結果之比較。

(a)黏土砂土互層試體；(b)黏土試體

正斷層作用砂土覆蓋粘土與純粘土層
地表及地下變位剖面的比較



80gNtest59-S/C　　80gNtest44-C-H

(a)　　(b)

圖 3.2.47 黏土砂土互層試體及純黏土試體，正斷層錯動試驗，地表剖面結果之比較。

(a)黏土砂土互層試體；(b)黏土試體

正斷層作用下砂土覆蓋粘土試體與純砂土試體
地下變位剖面的比較

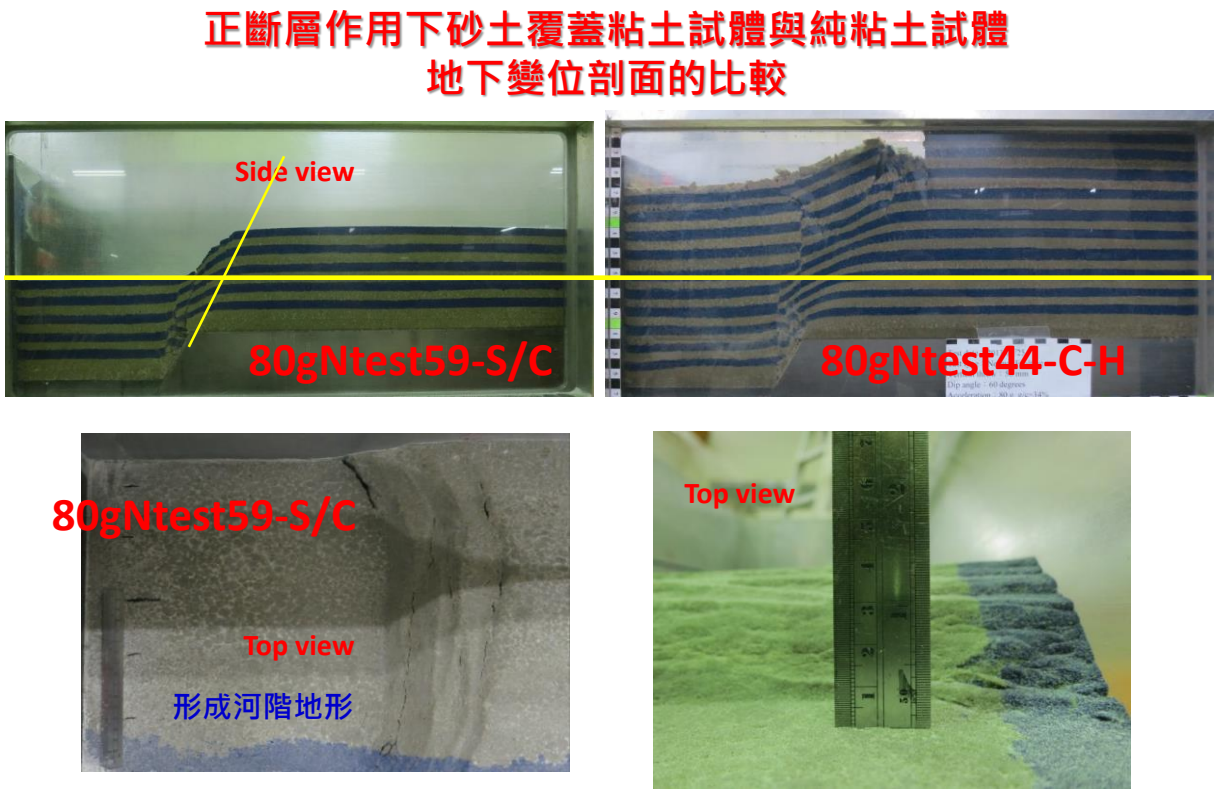


80gNtest59-S/C　　80gNtest25

(a)　　(b)

圖 3.2.48 黏土砂土互層試體及純砂試體，正斷層錯動試驗，地下破裂跡結果之比較。

(a)黏土砂土互層試體；(b)砂土試體



(a) (b)

圖 3.2.49 黏土及砂土互層試體，正斷層錯動試驗，砂及黏土界面之變形剖面照片

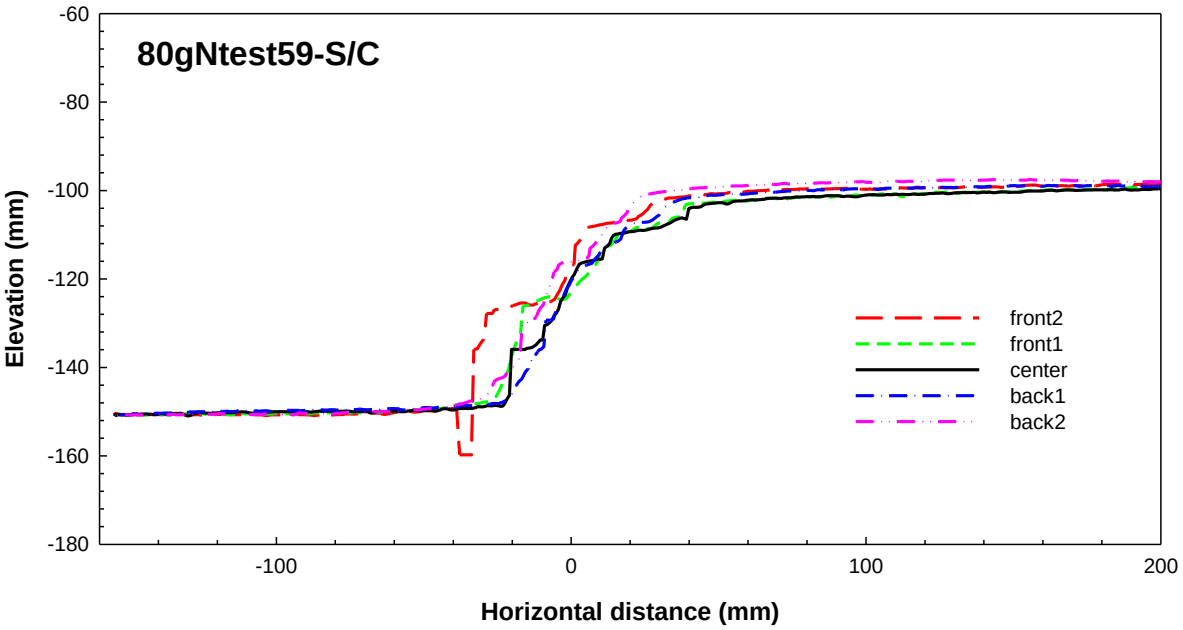


圖 3.2.50 黏土砂土互層試體，正斷層錯動試驗，砂及黏土界面之變形高程剖面

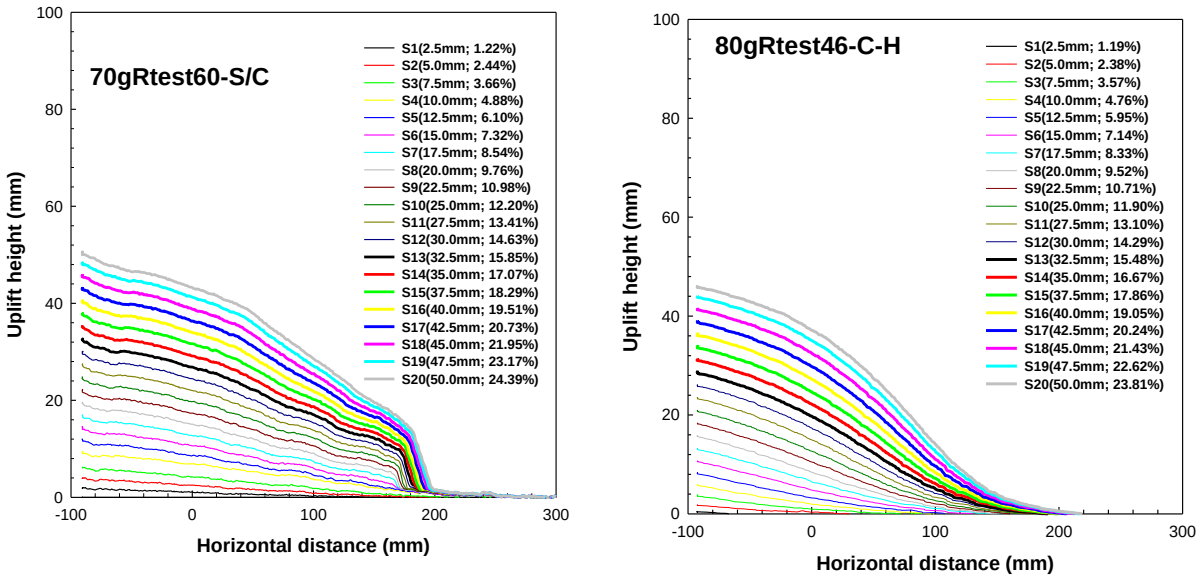


圖 3.2.51 黏土砂土互層試體，逆斷層錯動試驗，砂及黏土界面之變形高程剖面

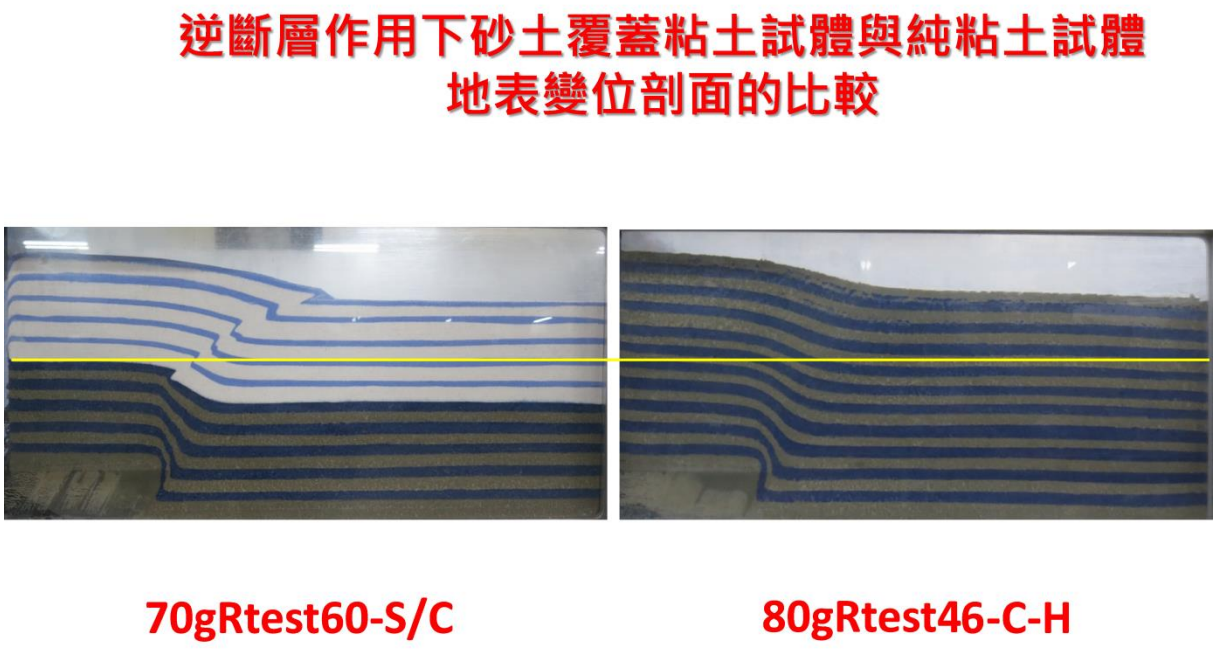


圖 3.2.52 黏土砂土互層試體，逆斷層錯動試驗，砂及土界面之地下破裂跡之比較

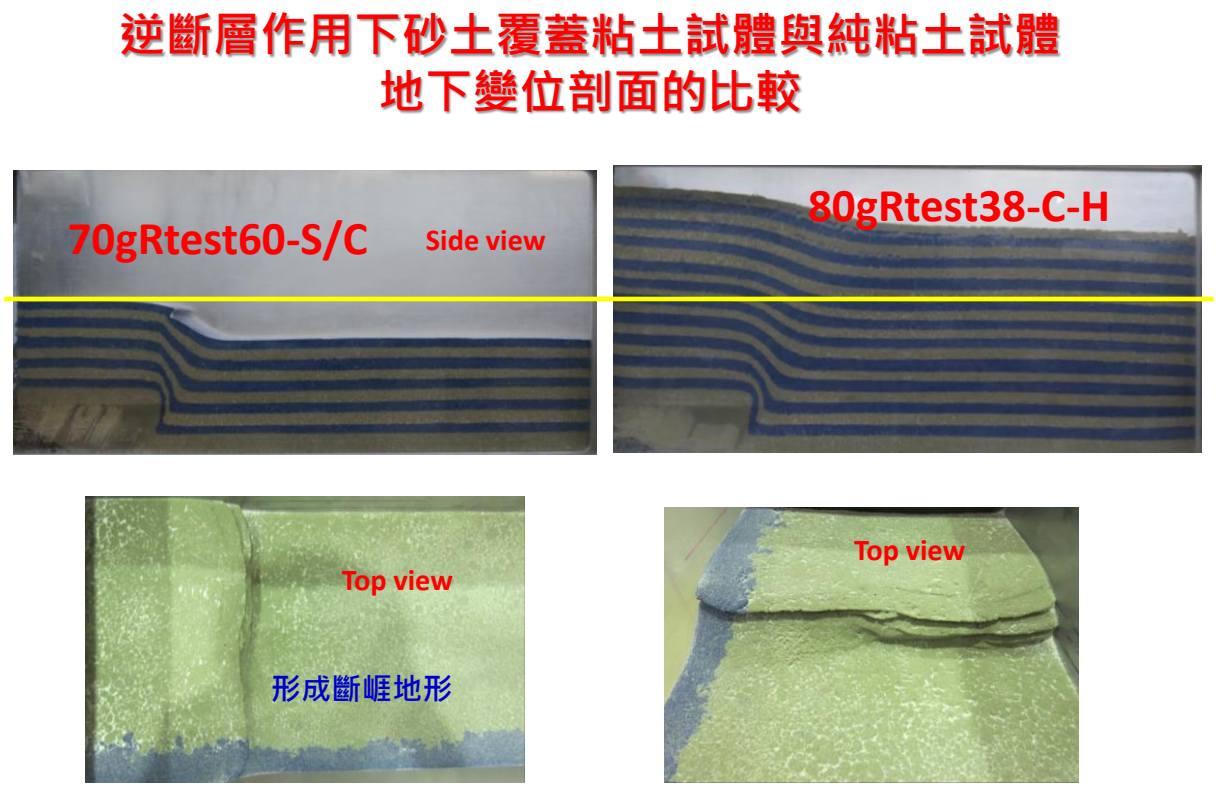


圖 3.2.53 黏土砂土互層試體，逆斷層錯動試驗，砂及黏土界面之變形剖面照片

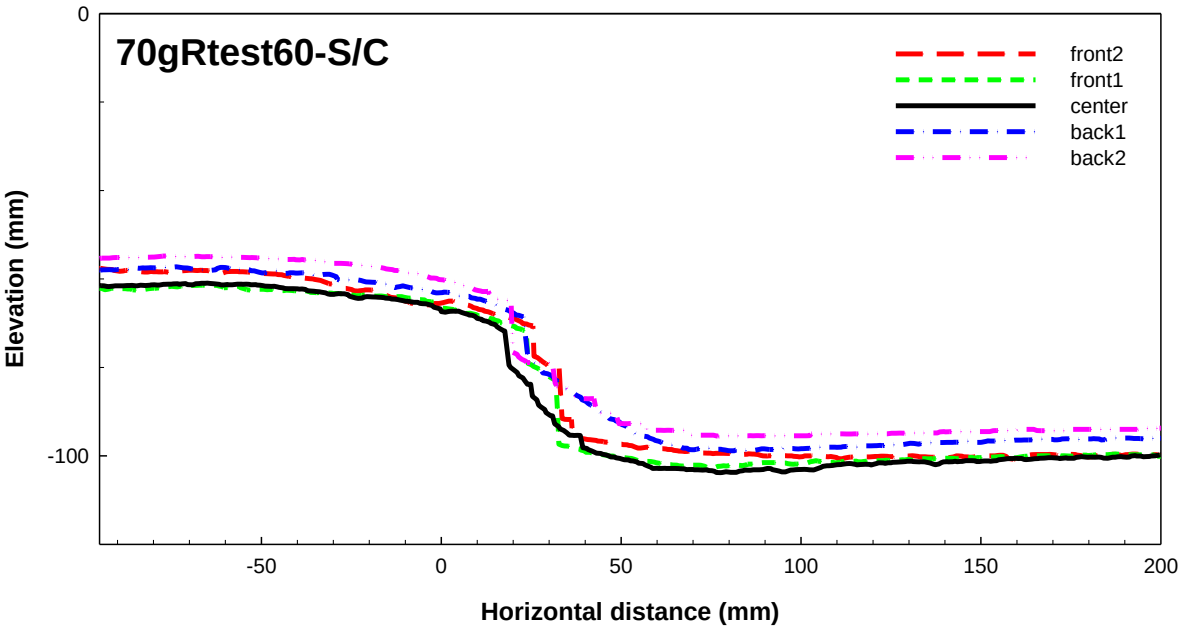
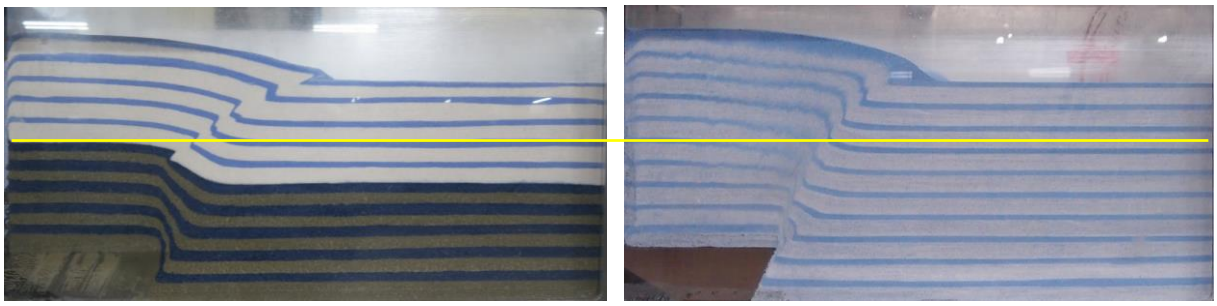


圖 3.2.54 黏土砂土互層試體，逆斷層錯動試驗，砂及黏土界面之變形高程剖面

逆斷層作用砂土覆蓋粘土試體與純砂土試體
地表變位剖面的比較



70gRtest60-S/C　　80gRtest23

圖 3.2.55 砂土及黏土砂土互層試體，逆斷層錯動試驗，地下破裂跡之比較

3.2.2 橫移斷層實驗結果

橫移斷層砂箱之實驗規劃如表 3.2.3，模型的斷層傾角為 90 度，覆土層厚度為 8 及 6 公分，並沿斷層面滑動 2 公分，再於其中一基盤進行抬升達 1.5 公分。試驗中滑移及抬升各階段進行拍照及地表掃描，透過雷射掃描儀量測可繪製出地表高程資料(圖 3.2.56)，並可用等高線與數值高程方式呈現。另針對連續攝影截圖可運用粒子影像測速分析法(Particle image velocimetry -PIV)，討論地表砂層位移特性，就測試階段亦可看出雷氏剪裂特徵(圖 3.2.57)，於側向目視，地表起伏約呈雁型排列，待下階段修正地表砂層鋪砂方式後，更能清楚觀察其現象。

表 3.2.3 模型試驗配置

Fault dip	Overburden thickness /Slip distance	Fault type
90°	8、6(cm)/ Y-2(cm)、Z+1.5(cm)	strike-slip fault/ Sinistral-slip fault

表 3.2.4 部分國外砂箱試驗之比較

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

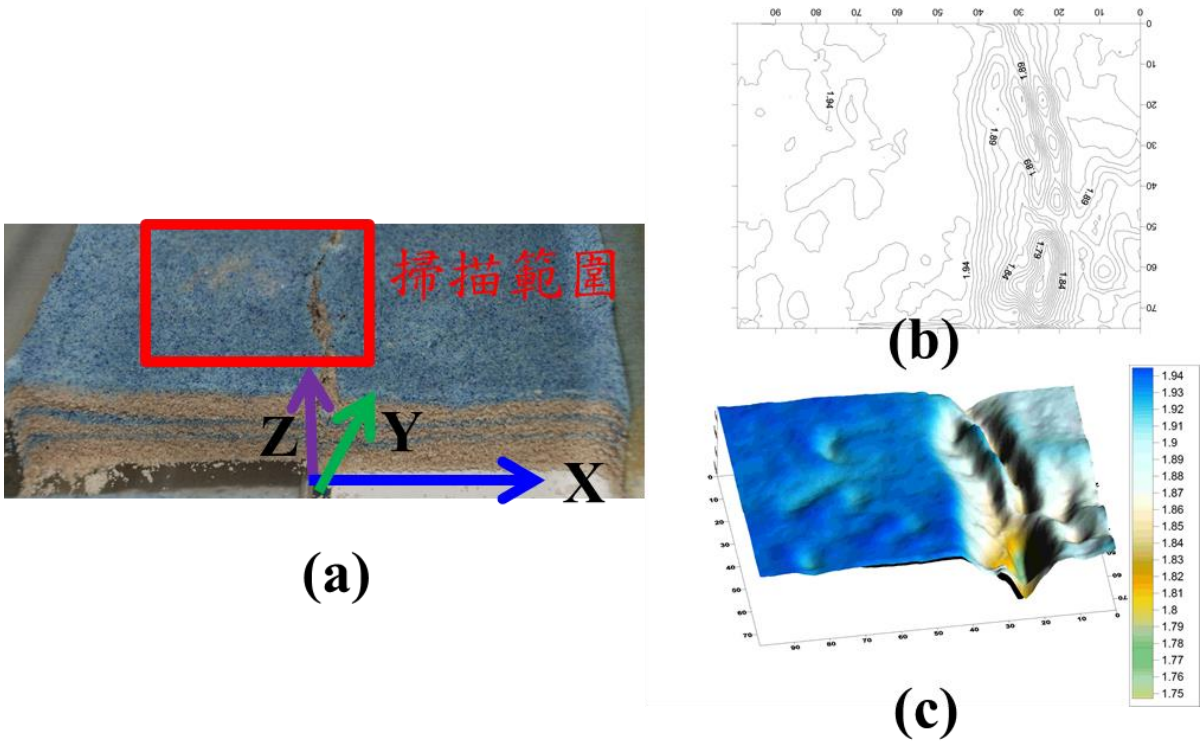


圖 3.2.56 橫移斷層砂箱實驗地表高程資料

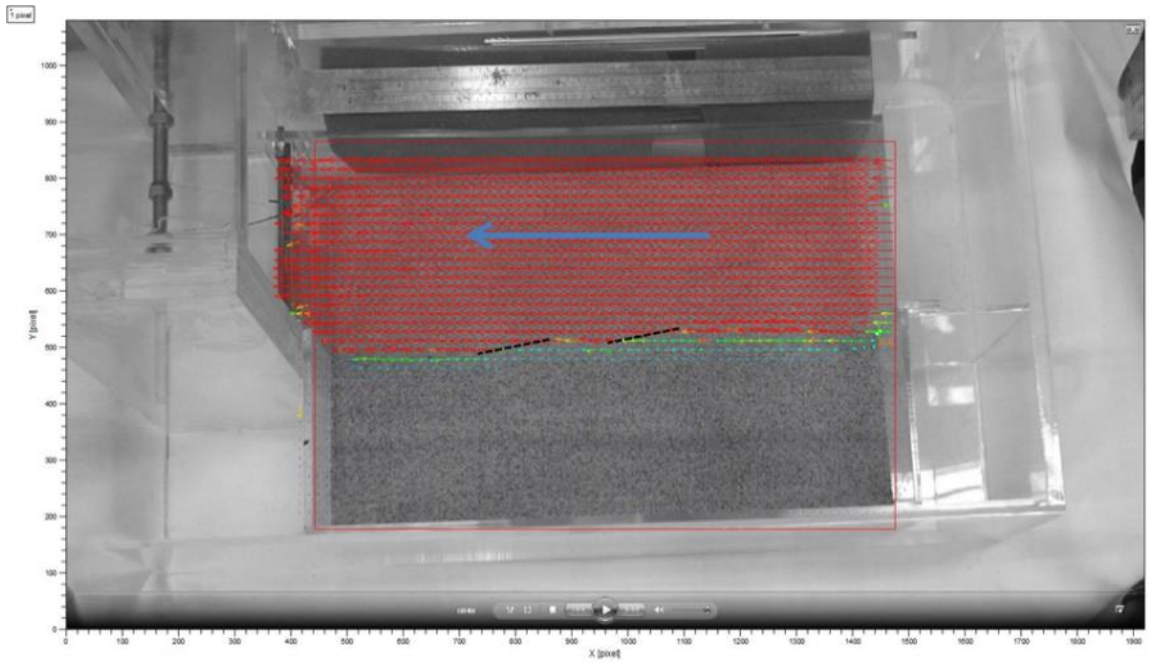


圖 3.2.57 橫移斷層砂箱實驗 PIV 影像分析

實驗中地表破裂跡歷程如圖 3.2.58，此模型的斷層傾角為 90 度，覆土層厚度為 6 公分，並沿斷層面左移 2 公分，再於左側砂盒進行抬升達 1.5 公分。試驗中每錯動 0.5 公分進行一次拍照記錄，其中下半側砂層地表挖取槽溝，可更易觀察斷層滑移行為，結果顯示在第二階段，滑移達 1 公分時地表有明顯破裂跡產生，且破裂方向與雷氏剪裂(圖 2.1.6)相同，第三階段滑移達 1.5 公分，有第二組破裂跡產生，其角度更平行於斷層面，第四階段產生貫穿砂土表面的破裂跡，此時進行左側砂盒得抬升，階段五並未看出抬升前後地表差異，至階段六抬升側(左側)發生圓弧狀破裂跡，且砂顆粒由抬升側滑移至未抬升的右盒，至階段七，左盒崩崖及右盒堆積更為顯著，在地表形成黃色點虛線範圍。透過試驗可觀察，地表因斷層作用之破裂跡影響範圍，在錯動初期範圍最廣，錯動後期影響範圍並未擴張而是在既有影響範圍內產生新破裂跡；因砂盒抬升形成地形高差之崩崖與堆積的影響範圍，在地形高差較小時影響範圍不明顯，在地形高差較大時，相對抬升側形成明顯崩崖且向後發展，相對陷落側形成堆積區且向前發展。

圖 3.2.59 顯示 0 至 2 階段的地表雷射掃描，左圖為掃瞄範圍，右圖可知左移過程中地表已有部分抬升及部分陷落，滑移 1 公分地表高程落差達 7 公厘。

與部分國外相似砂盒模型之比較，彙整如表 3.2.4，並整理各學者之實驗結果，透過滑移量(Sy)與地表影響範圍(W)分別對覆土層厚度(H)正規化，繪製圖 3.2.60 黑色符號表示比較不同覆土層厚度(H)進行正規化後結果，彩色符號代表不同學者成果，可看出一趨勢當 Sy/H 在接近 1 前有一高峰值，影響範圍 W/H 最大達到 2.7，而主要影響範圍接落在 W/H 為 1.5 以內。

透過圖 3.2.61 繪製雷氏剪裂受抬升作用後的改變，並疊合試驗影像，可觀察地表影響範圍包括斷層橫移破裂跡與抬升崩崖堆積範圍。

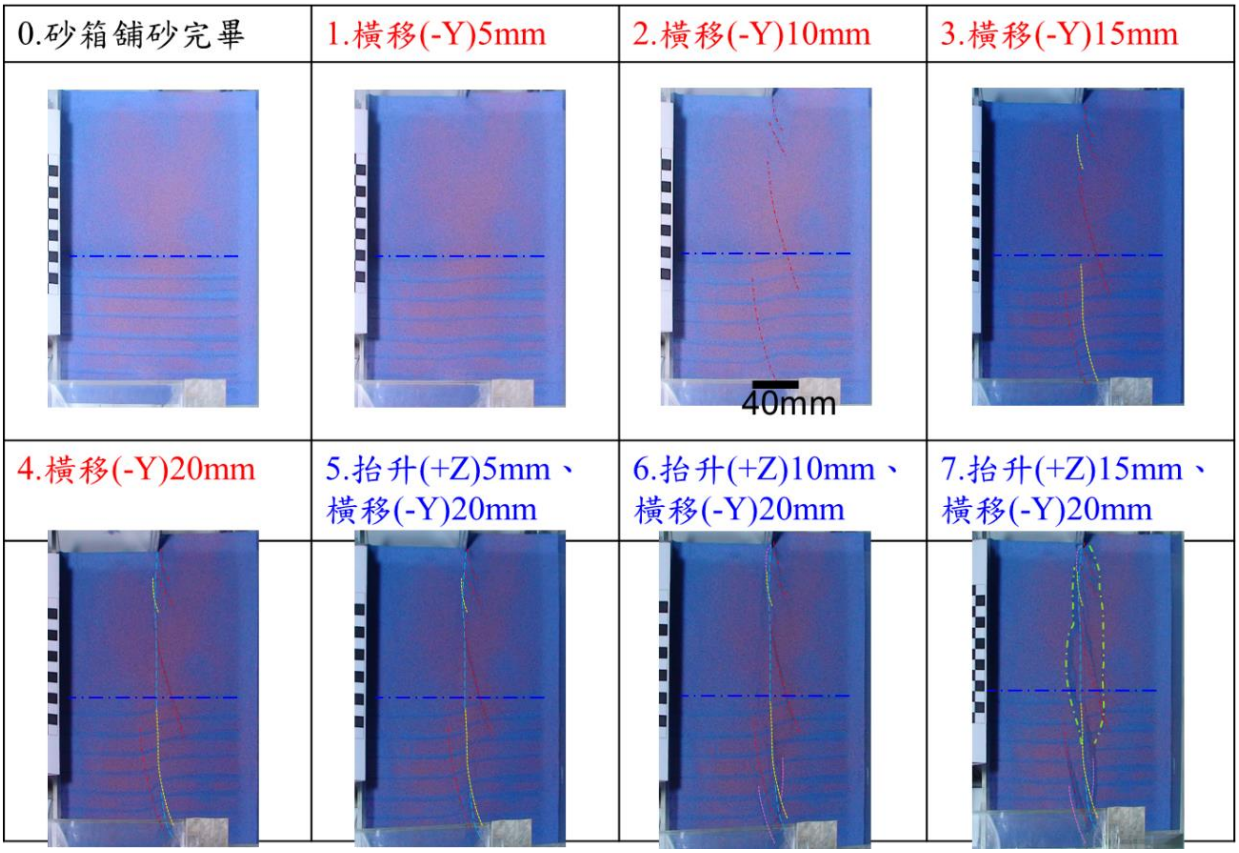


圖 3.2.58 橫移砂箱試驗之地表破裂跡歷程

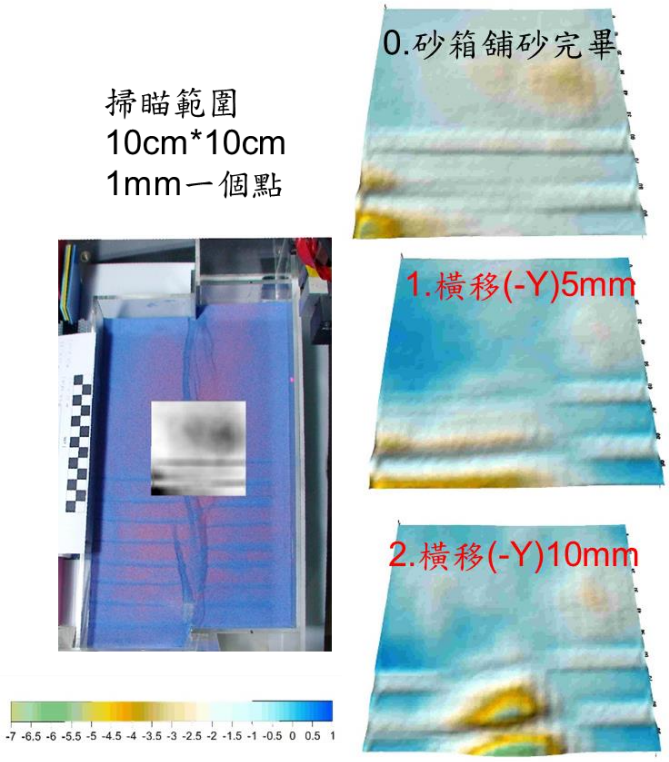


圖 3.2.59 橫移砂箱試驗之雷射位移掃描計掃描結果

H(cm)	S_y (cm)	W(cm)	Sy /H	W/H
6.00	1.00	4.00	0.17	0.67
6.00	1.50	4.00	0.25	0.67
6.00	2.00	4.00	0.33	0.67

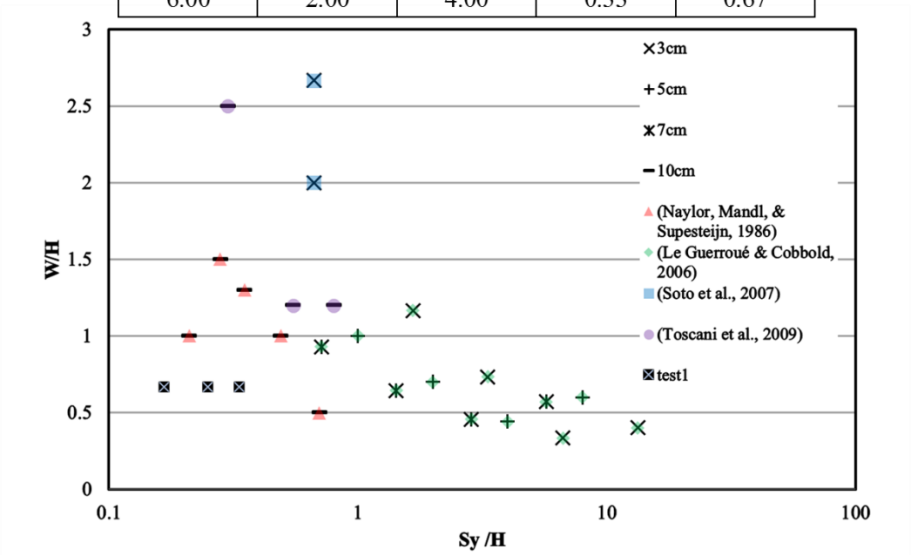


圖 3.2.60 橫移砂箱試驗之地表破裂跡發展影響範圍



圖 3.2.61 砂箱試驗第七階段地表破裂跡與影像疊合圖

3.3 數值模擬

3.3.1 微觀參數取得

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)。由去年之研究結果(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 3.3.1 中微觀參數可以獲得之摩擦角最大僅約 32 度，較不符合本研究中常見土壤種類(目前大多常見礫石、砂或黏土)所應有之摩擦角，因此，本年度前半年嘗試其他可能影響摩擦角變因，試圖提升模擬摩擦角之上限值，另外，由於黏土等具有凝聚力之土壤也常出現於研究地層中，因此，本研究亦著手找出在直剪狀況下，具有凝聚性材料之凝聚力與摩擦角與微觀參數之對應關係。

由先前分析結果可以得知，對於無凝聚力材料而言，影響其摩擦角之主要原因為正向勁度、切向勁度以及波松比，然而，先前研究僅針對某一固定顆粒組成狀況(0.2mm~1.0mm 之間，每隔 0.2mm 產生一種尺寸之粒徑，每種粒徑約 1200 顆，共 6000 顆)下之分析結果，若顆粒尺寸改變，則亦可能會影響到其顆粒之間相互爬升之難易度，顆粒尺寸若愈大，則可以預期其爬升所遇之阻力可能愈大，轉化而得之剪力可能也愈大，也因為上述原因，本研究另行規畫使用粒徑尺寸 0.3mm，0.5mm，0.74mm，1.5mm 四種粒徑，並考慮在上述四種粒徑下，另有 4 種微觀輸入參數，其中切向勁度與正向勁度之比值假設為 1/3，分析結果如表 3.3.1 所示。

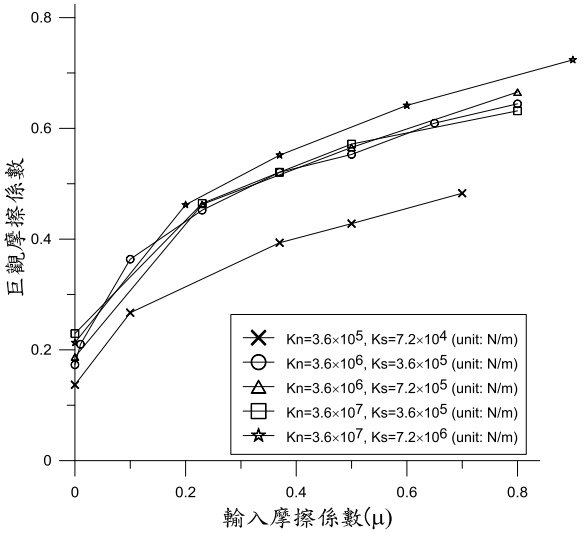


圖 3.3.1 直剪試驗數值模擬下微觀與巨觀摩擦角之關係

表 3.3.1 考慮顆粒尺寸下無凝聚力材料之微觀參數與摩擦角之關係

輸入參數 (N/m) / 顆粒尺寸 (mm)	a $\mu = 0.24$ $K_n = 3\times10^6$ $K_s = 3.6\times10^5$	b $\mu = 0.24$ $K_n = 7.2\times10^6$ $K_s = 2.4\times10^6$	d $\mu = 0.24$ $K_n = 1.8\times10^7$ $K_s = 2.0\times10^6$	c $\mu = 0.24$ $K_n = 3.6\times10^7$ $K_s = 1.2\times10^7$
0.3	24.16°	25.77°	27.16°	24.9°
0.5	27.67°	27.89°	29.02°	30.38°
0.74	37.3°	39.07°	37.92°	40.3°
1.5	35.44°	38.49°	38.3°	41.3°

由表 3.3.1 可以得知，原先摩擦角之上限僅約在 32 度，且此一上限乃在相對較高之輸入微觀參數下而得，而由分析結果可以得知，固定某一組微觀輸入參數下，其相對應之摩擦角隨顆粒尺寸增加而變大，最小的一組正向勁度(即表 3.3.1 之 a 組)代表之最大摩擦角約為 37 度，且其對應之顆粒尺寸為 0.74mm，其他微觀輸入參數亦有類似趨勢，而由表 3.3.1 亦可以看出，當顆粒尺寸增加到 1.5mm 時，其摩擦角上升之幅度有限，甚至有些組之微觀輸入參數會微幅下降 0.5 到 1 度。由此一分析結果可以得知，顆粒群所代表之巨觀摩擦角與顆粒尺寸亦相關，且影響其摩擦角之變化亦相當敏感。本研究中若數值分析中需要模擬某一摩擦角之地層，則建議可以參考表 3.3.1 分析結果選擇適當之輸入參數，以進行後續之模擬。

另外，如同先前所言，黏土等具有凝聚力之土壤在目前之研究地層中也屬常見之地層，因此，本年度之研究重點亦著重於凝聚性土壤之微觀輸入參數與巨觀參數之關係，此處所言之巨觀參數便為材料之凝聚力與摩擦角。對於凝聚性材料之輸入參數而言，可用模擬軟體內之接觸勁度模式搭配描述平行鍵結之參數做為輸入值。接觸勁度模式即為前述無凝聚性材料所使用之力學模式，其輸入參數為正向勁度、切向勁度以及波松比，描述平行鍵結所需之微觀參數為：(1)平行鍵結之正向勁度(parallel bond normal stiffness)；(2)平行鍵結之切向勁度(parallel bond shear stiffness)；(3)平行鍵結之正向強度(parallel bond normal strength)；(4)平行鍵結之切向強度(parallel bond shear strength)；(5)鍵結半徑比(radius multiplier)。

針對上述具凝聚性材料之直剪分析而言，本研究初步選擇如表 3.3.2 之參數，並先於固定單一粒徑 0.74mm 下進行分析，所得結果如表 3.3.2 所示。

表 3.3.2 凝聚性材料之微觀輸入參數

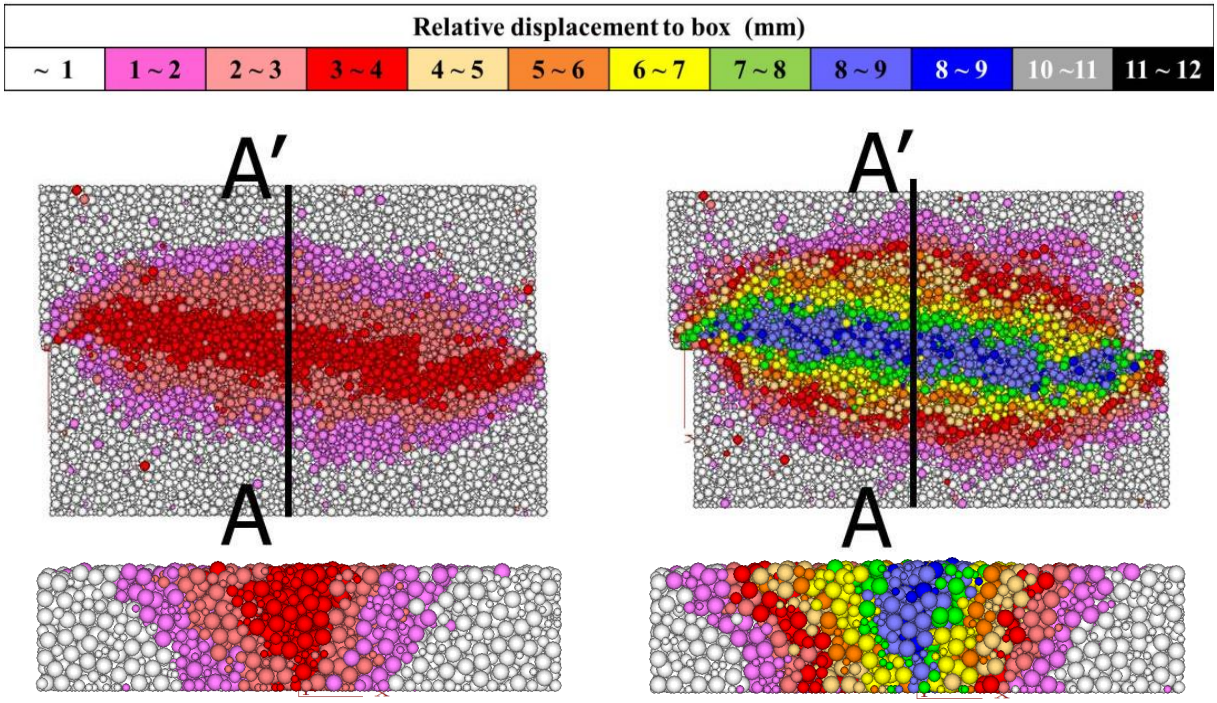
<table>
<tr><td colspan="4">接觸勁度模式輸入參數</td></tr>
<tr><td>$\mu = 0.24$
$K_n = 6.0\times10^6$ (N/m)
$K_s = 2.0\times10^6$ (N/m)</td><td>$\mu = 0.24$
$K_n = 1.8\times10^7$ (N/m)
$K_s = 6.0\times10^6$ (N/m)</td><td>$\mu = 0.24$
$K_n = 3.0\times10^7$ (N/m)
$K_s = 1.0\times10^7$ (N/m)</td><td>$\mu = 0.24$
$K_n = 3.6\times10^7$ (N/m)
$K_s = 1.2\times10^7$ (N/m)</td></tr>
<tr><td colspan="4">平行鍵結模式輸入參數</td></tr>
<tr><td colspan="4">$Pb_K_n = 3.6\times10^7$ (N/m); $Pb_K_s = 1.2\times10^7$ (N/m);
$Pb_nstr = Pb_sstr = 100\times10^3$ (Pa)</td></tr>
<tr><td colspan="4">分析結果(摩擦角與凝聚力)</td></tr>
<tr><td>ϕ=40.61°
c=9840.1Pa</td><td>ϕ=41.93 °
c=10453Pa</td><td>ϕ=42.28°
c=8501.6 Pa</td><td>ϕ=42.35°
c=8338Pa</td></tr>
</table>

由表 3.3.2 之分析結果可以得知，當固定平行鍵結模式中之參數時，隨著接觸勁度模式內之正向勁度參數提升，其摩擦角亦跟著增加，而由於平行鍵結模式中之參數固定不變，可以發現其對應之凝聚力僅在 8-10kPa 之間變化。就後續工作而言，本研究將對於其他影響凝聚力之微觀參數進行分析，以期提供相對應之數值分析輸入參數給其他數值模型使用。

3.3.2 橫移斷層數值模擬結果

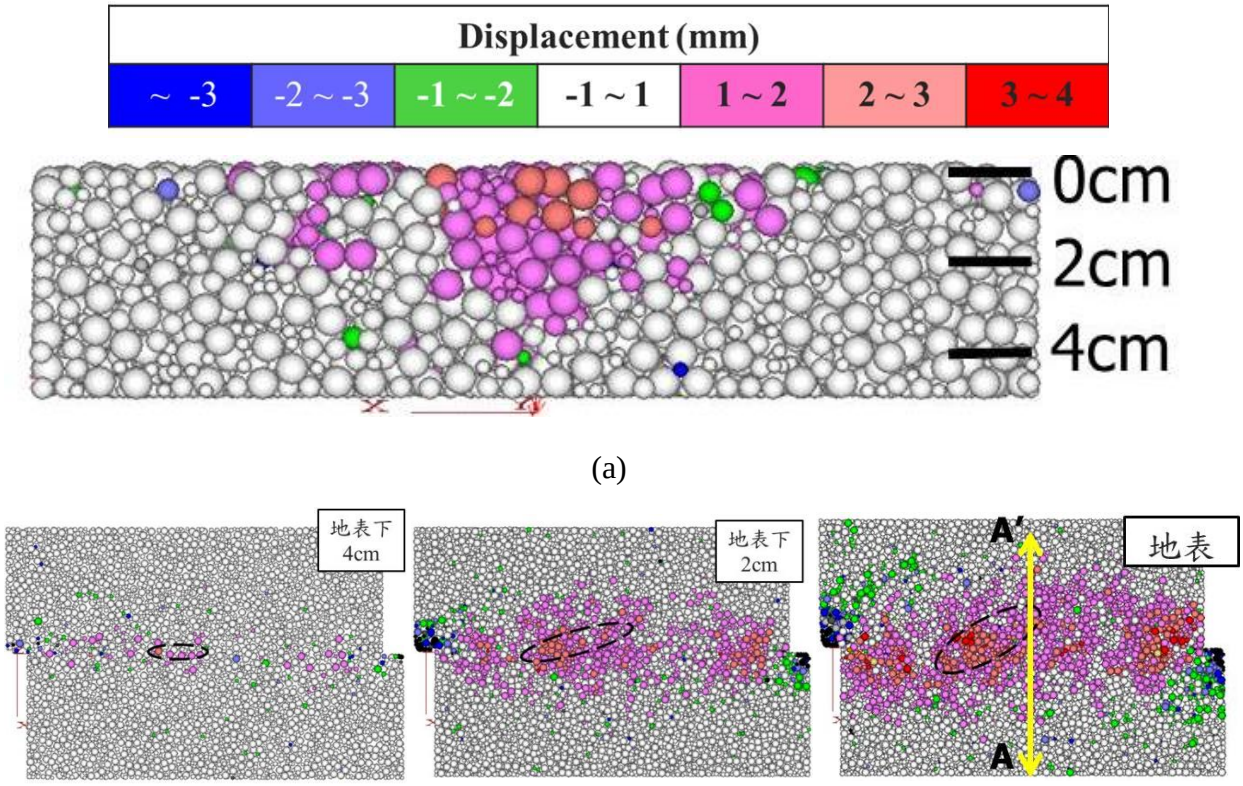
為了觀察橫移斷層錯動時造成上覆土層的剪切帶寬度，本研究在數值模擬過程中監測每一顆顆粒的位移，以下將展示 Y 方向位移及 Z 方向位移的模擬結果，並加上定性的描述。圖 3.3.2 為顆粒的 Y 方向位移之結果展示，所謂 Y 方向位移，乃是顆粒相對於外盒的移動所監測出來的結果，也就是隨著斷層錯動 1cm、2cm(上下盒各錯動 0.5cm 及 1cm)，顆粒相對於外盒的 Y 方向位移。由此結果可以看到剪切帶之整體發展範圍，由俯視圖來看像是一個凸透鏡的形狀，而越接近斷層線上的顆粒位移量越大，如果比較錯動 1cm 及錯動 2cm 的結果，可以看到同一個位移量的分佈範圍在 2cm 其寬度是越窄的，由於位移量經過一次微分即為應變量，也就是當位移量分佈範圍越窄時，剪應變越大；由 AA'的側視圖來看則接近花狀構造，越接近地表，同一個位移量的分佈範圍越廣，越接近基盤，同一個位移量的分佈範圍越窄，如果比較錯動 1cm 及錯動 2cm 的結果，此一現象在錯動 1cm 時較為明顯。

圖 3.3.3 為橫移斷層數值模擬錯動 2cm 時，AA'剖面上顆粒 Z 方向位移的示意圖，亦即顆粒被抬升或陷落的示意圖，由圖 3.3.3(a)中可以看到顆粒抬升的集中區分部在花狀構造內部。圖 3.3.3(b)~(d)為地表下 4cm 至地表，不同深度的俯視圖，地表下 4cm 的顆粒抬升的集中區分佈在斷層線上，隨著深度變淺，可以看到顆粒抬升的集中區分佈範圍呈現雁形排列，並且與斷層線的夾角有變大的趨勢。由目前的數值模擬分析成果與砂箱實驗結果相近可以看出



(a)錯移 1cm　　(b)錯移 2cm

圖 3.3.2 橫移斷層數值模擬結果(Y 方向位移)



(a)

(b)　　(c)　　(d)

圖 3.3.3 橫移斷層數值模擬結果(Z 方向位移)

3.3.3 如何在逆、正斷層數值模擬中定義剪切帶及主破裂面

正逆斷層錯動模擬完畢，由 PFC 程式輸出文字檔後，再利用 Matlab 軟體描繪砂層的變位網格型態，接著連結各次層曲率半徑最小的點，可以決定上下兩個主破裂面。這組破裂面可以代表斷層尖端發展至地表的主要軌跡，兩條主破裂面的範圍可以視為剪切帶(shear band)。圖 3.3.4 為數值模擬逆斷層錯動地下破裂跡之決定方法(Chang *et al.* 2013; 李崇正等 2012)。

在生長斷層的數值模擬中，由於錯動不只一次，因此有另一個定義剪切帶範圍的方式，是給予不同的生長層不同的顏色，如同在砂箱實驗中的染色砂層一樣，當生長斷層錯動模擬完畢，由 PFC 程式直接輸出圖像檔後，用人工判識的方式圈繪剪切帶，如圖 3.3.5，其判識的規則如下：

1. 連結下盤各染色砂層明顯因錯動而轉彎之點。
2. 連結上盤各染色砂層明顯因錯動而轉彎之點。
3. 連結上盤染色砂層曲率半徑最小的點。
4. 連結上盤顆粒間空隙較大的點(出現在地表附近)。

在此人工判識圈繪剪切帶的定義之下，所圈繪出來的範圍並非一次性錯動所造成剪切帶，而是經過多次的生長與錯動作用之下而呈現出來的剪切帶，並且越下層的生長層其累積應變越大。

另一個在生長斷層中圈繪剪切帶的方式則是利用 MatLab 自動判識，其方式是在生長層鋪設完畢，斷層錯動前，先在想要監測剪應變的範圍內設置節點，每 4 個節點所圍成的範圍稱為節點網格，如圖 3.3.6 所示，透過記錄斷層錯動過程中節點的座標，可以計算出節點網格的剪應變量，以橢圓率來表示。當節點網格的橢圓率超過一個門檻值的時候，就給予該節點網格內的顆粒一個不同的顏色，以此來定義剪切帶的範圍，如圖 3.3.7 所示。依據粘為東(2010)的建議，橢圓率門檻值應選在 1.5($\gamma = 41\%$)，不過本研究仍針對橢圓率門檻值做了敏感度分析。與人工判識的定義比較，自動判識所圈繪出來的範圍為一次性錯動所造成的剪切帶。

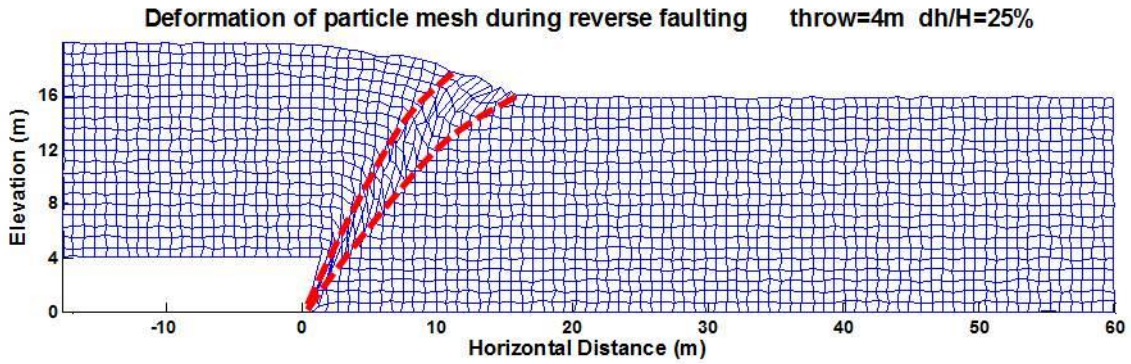


圖 3.3.4 數值模擬逆斷層錯動地下破裂跡之決定

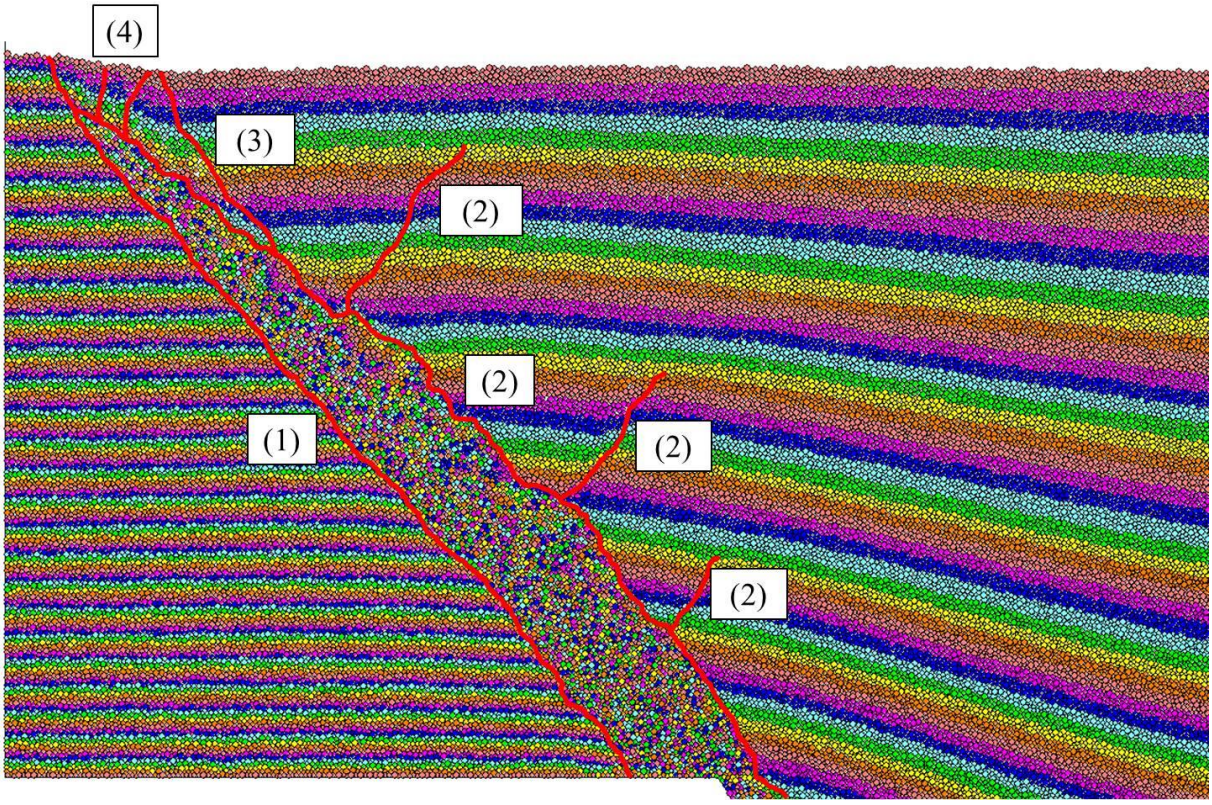


圖 3.3.5 生長斷層數值模擬中以人工判識圈繪剪切帶

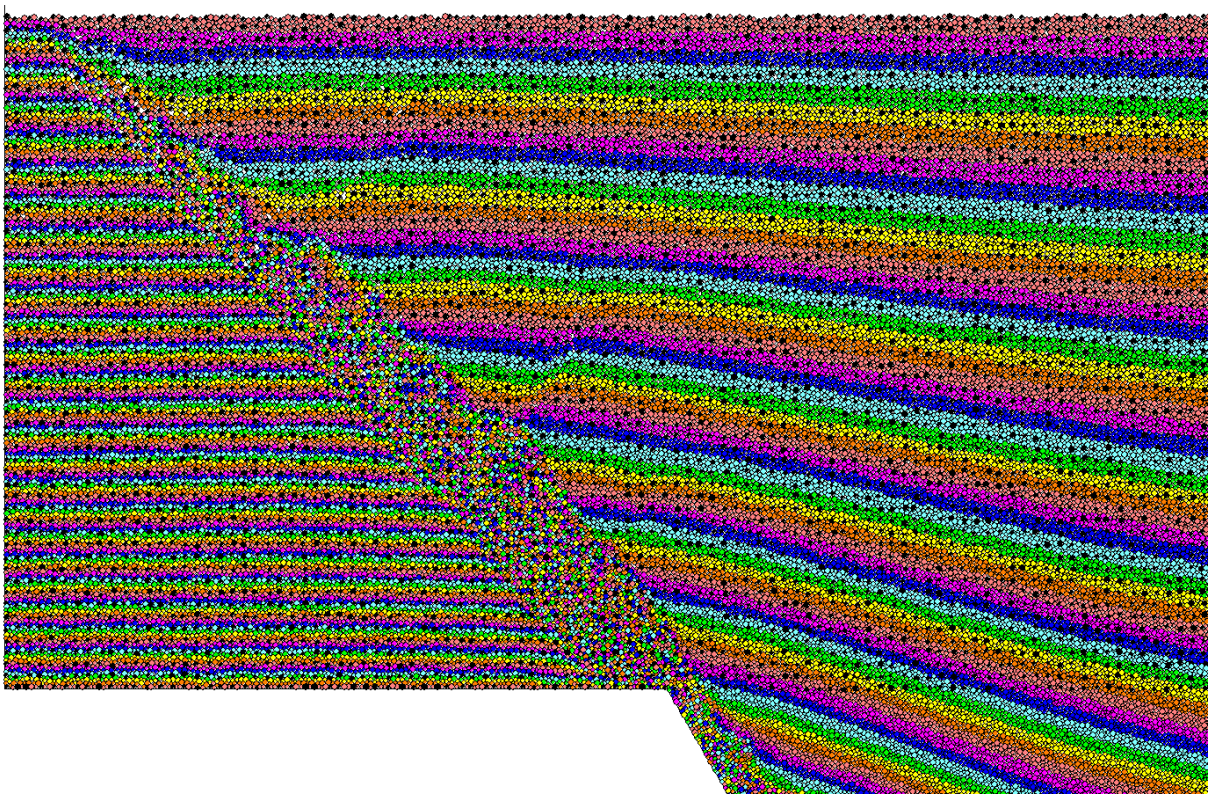


圖 3.3.6 在生長斷層數值模擬中設置監測點

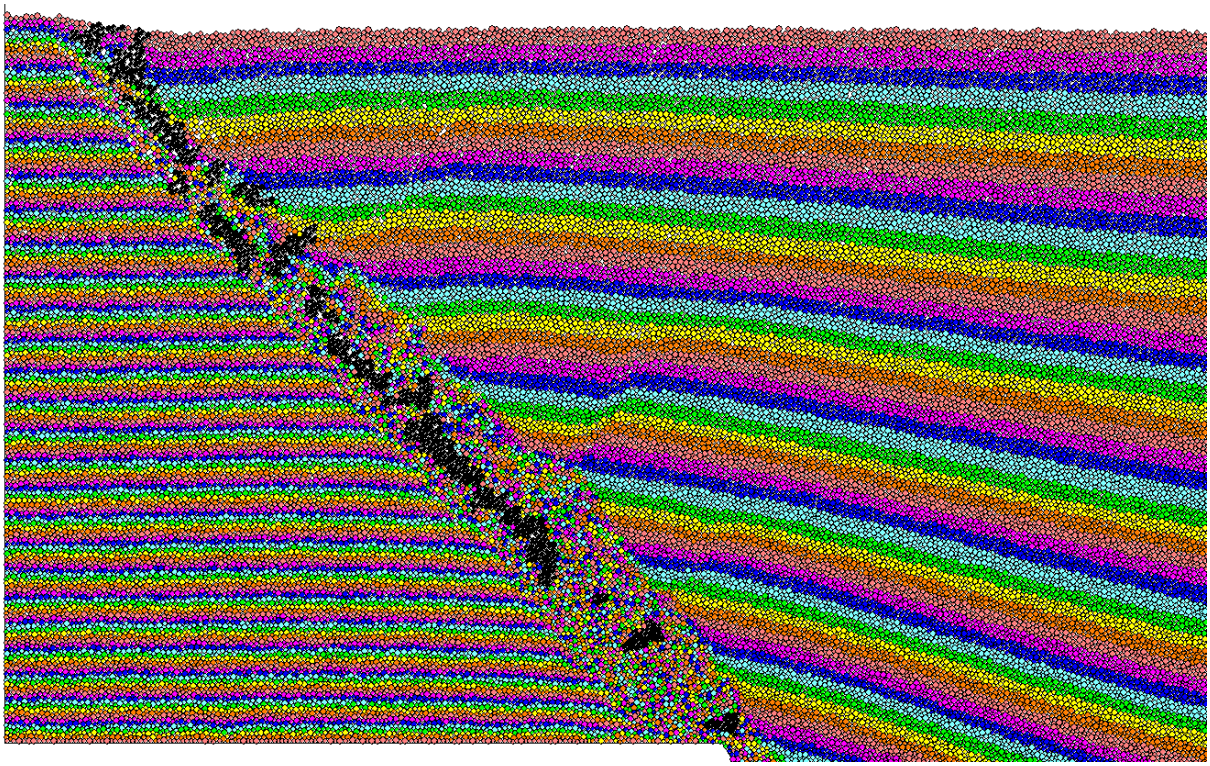


圖 3.3.7 生長斷層數值模擬中以自動判識圈繪剪切帶(建議橢圓率門檻值 1.5，$\gamma = 41\%$)

3.3.4 正逆斷層數值模擬結果

3.3.4.1 無生長斷層之逆、正斷層

圖 3.3.8 為利用 PFC2D 在不同 g 值(1g,40g,80g)下，進行逆斷層錯動試驗的數值模擬(錯動角60°)，在不同的垂直錯動比(r)計算所得之地表剖面與離心模型試驗結果之比對。圖中直線代表物理模型試驗的結果，而不同符號(symbols)則代表數值模擬的結果。比較結果顯示利用自重壓密校正所得之微觀參數，進行數值模擬，離心模型試驗結果與數值模型所得結果相當一致。相對而言，高 g 情況的數值模擬及離心模型的結果，兩者間的吻合度較高。造成的原因主要為在 1g 的條件下進行物理模型試驗，砂顆粒間的毛細現象(capillary effect)，會造成顆粒間的接觸力增大，而數值模擬則無法模擬此毛細壓力所引致的接觸力。

圖 3.3.9 利用 PFC2D 在不同 g 值(1g,40g,80g)下，進行逆斷層錯動試驗的數值模擬，計算所得之地下破裂跡與與離心模型試驗地下破裂跡結果之比對。圖中紅實線為離心模型試驗所得之上破裂跡及下破裂跡，黑虛線則為 PFC2D 計算結果。兩者之破裂跡之趨勢一致，都向下盤彎斜。g 值愈高，剪切帶的寬度愈窄，但是由 PFC2D 算出的上破裂面與下破裂面的範圍(剪切帶)為較寬（約 20mm，原型尺寸約 1.6m），並且向下盤位移約 15mm(原型尺寸約 1.2m)。造成此差異的原因，主要是 PFC2D 數值模擬砂顆粒尺寸，較離心模型使用砂顆粒尺寸大 20 倍所造成，顆粒愈大，剪切帶的範圍也愈寬。

斷層錯動所造成地表變位剖面的形狀、範圍及高程變化，可以用來評估合理的建物後退距離（setback width）。構造物之容許沉陷量視地層、基礎型式、載重大小、構造物種類、使用條件及環境因素而異。一般以差異沉陷所產生的容許角變量來設計。因此掌握地表變位剖面的斜率，將有助於後退距離的決定。因此利用物理模型試驗及數值模擬所得到之地表變位剖面，選用適合的函數來模擬，然後將函數微分，則可以有助於基礎角變位的掌握。圖 3.3.10 在 80g 的試驗條件下，進行離心模型逆斷層錯動試驗，在不同的垂直錯動比(r)之地表變形剖面。圖中顯示地表變形剖面是一 sigmoid 函數，因此選用 Gompertz 函數來模擬不同垂直錯動比(r)之地表變形剖面。Gompertz 函數的公式

$$y(t) = ae^{be^{ct}} \quad \text{(Eq.3.3.1)}$$

此函數可以利用 a、b，c 三個變數來表示不同形狀及大小的 S 形曲線。其中 a=漸近線的上限值，$ae^{be^{-\infty}} = ae^0 = a$；b, c 是負值；b 可以調整 y 軸的大小；c 可以調整曲線變化成長的速率。圖 3.3.11 為 Gompertz 函數三個變數的改變對曲線形狀及大小的影響示意圖。因此利用 Gompertz 函數經由調整三個變數可以來描述在不同的垂直錯動比(r)之地表變形剖面。

配合前面斷層錯動引致地表變形剖面所用的座標系統(圖 3.3.12)，Gompertz 函數可以改寫成：

$$\text{f(x)} = y_o + ae^{-e^{\frac{-(x-x_o)}{b}}} \quad \text{(Eq.3.3.2)}$$

其微分式可寫成

$$f'(x) = \frac{a}{b}\left[e^{-e^{-\left(\frac{x-x_0}{b}\right)}}\right]e^{-\left(\frac{x-x_o}{b}\right)} \quad \text{(Eq.3.3.3)}$$

圖 3.3.13 為利用 Gompertz 函數來描述地表變形剖面及斜率之示意圖，其中待定的三個參數為$\boldsymbol{x_o, a, b}$。比較圖 3.3.11 及圖 3.3.12 可以發現利用 Gompertz 函數來描述地表變形剖面及其斜率。不同的地表變形可用不同的 Gompertz 方程式來表示，而每一條 Gompertz 方程式可得出 a、b、x_0 及 y_0 等四個參數。

其中

f：Gompertz 方程式，代表之水平距離

f'：代表地表變形斜率

y_0：代表下盤之高度(同常假設為 0)

x：指斷層尖端至地表上示任一點之水平距離

x_0：最大地表變形斜率位置與斷層尖端之水平距離

b：地表變形之方向，負號代表曲線向左斜、正號代表曲線向右斜

a：代表錯動後上盤之高度

圖 3.3.14 為逆斷層離心物理模型試驗(實線)與 Gompertz 之回歸方程式(虛線)，相關之參數數值如表 3.3.3 所示，因為 $y_0 \fallingdotseq 0$，所以每個不同的地表變形可將 y_0 假設為 0，

地表變形可僅以 a、b、x_0 表示之。

本研究定義地表變形影響範圍(affecting length)係採用角變量與建築物損壞程度關係表(表 3.3.4)，當建築物角變量達 1/150 時建築物開始產生損害。若我們將角變量達 1/150 代入 Eq.3.3.2，則可求得 x_1 與 x_2 值(如圖 3.3.14)，則 x_1 與 x_2 間之距離定義為斷層錯動後地表變形的影響範圍。下文說明求取逆斷層地表變形影響範圍流程(圖 3.3.15)，求取逆斷層地表變形影響範圍步驟如下：

以 PFC2D 數值模擬不同 g-level(1g,10g,40g,80g)及不同斷層傾角(22.5°~67.5°)的地表變形剖面。求取不同斷層傾角(22.5°~67.5°)及 r=1.25%~25%之地表變形剖面。

將求得之地表變形進行 Gompertz 回歸線，並求得不同地表變形下之 Gompertz 參數 a、x_0 及 b 值

將不同 g-level(1g,10g,40g,80g)的參數 a、x_0 及 b 值做回歸將角變量(f'=1/150)及回歸之參數 a、x_0 及 b 值代入 Gompertz 方程式，則可求出 x_1 與 x_2 值。x_1 與 x_2 之距離即為逆斷層地表變形影響範圍。當傾角為 60°下 x_1 與 x_2 值如表 3.3.5 及表 3.3.6 所示。圖 3.3.15 為求取地表影響範圍流程圖。

表 3.3.5 及表 3.3.6 為斷層傾角=60°的地表變形影響範圍，不同的斷層傾角(22.5°~67.5°)就會有不同之 L_{x1}/H 及 L_{x2}/H。將不同斷層傾角(22.5°~67.5°)做以 Matlab SFtool 回歸則可得二回歸曲線如方程式 Eq.3.3.3、Eq.3.3.4 所示，相關回歸圖如圖 3.3.16 及圖 3.3.17 所示：

$$\frac{L_{x1}}{H} = 1.134 - 0.2015r - 0.0242\alpha + 0.01304\alpha r - 5.27x10^{-5}\alpha r^2 + 9.399x10^{-7}\alpha r^3 - 2.323x10^{-4}r\alpha^2 + 1.414x10^{-6}r\alpha^3 \quad \text{(Eq.3.3.4)}$$

$$\frac{L_{x1}}{H} = 1.541 - 0.03842r - 0.01841\alpha + 1.573x10^{-3}\alpha r - 1.497x10^{-4}\alpha r^2 + 3.3x10^{-6}\alpha r^3 + 3.49x10^{-7}r\alpha^2 - 5.135x10^{-9}r\alpha^3 \quad \text{(Eq.3.3.5)}$$

其中 r=h/H 為基盤推升量與覆土厚度之比值、α 為斷層傾角。

因此利用 Eq.3.3.4 及 Eq.3.3.5，可以估計不同傾角的逆斷層錯動下，不同斷層頂升量下的地表影響範圍。圖 3.3.16 及圖 3.3.17L_{x1}/H 及 L_{x2}/H 的 Matlab SFtool 圖。

圖 3.3.18 為 PFC2D 數值模擬 80g 下之正斷層錯動地表影響範圍，其中 L_{tot} 表示總影響範圍，L_p 表示主要影響範圍，L_s 表示次要影響範圍，L_{fb} 表示從斷層尖端至崖坡起點之距離。

不同的 PFC2D 數值模擬 80g 下之正斷層基盤陷落與土層厚度之不同錯動比 r_n，可透過 Getdata 軟體量測得崖坡起點之位置及上盤沉陷之變化點，崖坡起點之位置與斷層尖端之距離為 L_{fb}，崖坡起點之位置與上盤沉陷之變化點之距離為 Ltot。不同 r_n(%)與斷層傾角 60°之 L_{fb} 與 L_{tot} 可會成圖 3.3.19。將不同之斷層傾角與 r_n(1.25%, 5%,10%,15%,25%)可透過 Matlab SFtool(如圖 3.3.20)可求得 L_{fb}、L_p、L_s 及 L_{tot} 之回歸方程式，相關方程式如下方程式所示。由 Eq.3.3.6、Eq.3.3.7 及 Eq.3.3.8 所得之 L_p 影響長度如表 3.3.7 所示，L_s/H 影響長度如表 3.3.8 所示。

$$\frac{L_{fb}}{H} = 0.7865 + 0.01548r_n - 0.007278\alpha - 1.408x10^{-4}\alpha r_n - 6.82x10^{-6}\alpha r_n^2 \quad \text{(Eq. 3.3.6)}$$

$$\frac{L_p}{H} = \frac{L_{fb}}{H} + \frac{r_n}{100(\tan\alpha)} \quad \text{(Eq. 3.3.7)}$$

$$\frac{L_{tot}}{H} = 1.679 + 0.060834r_n - 0.01364\alpha - 3.785x10^{-4}\alpha r_n - 1.894x10^{-6}\alpha r_n^2 \quad \text{(Eq. 3.3.8)}$$

$$\frac{L_s}{H} = \frac{L_p}{H} + \frac{L_{tot}}{H} \quad \text{(Eq. 3.3.9)}$$

其中 r_n 表示正斷層陷落量、α 為斷層傾角。

表 3.3.3 80gRtest23Gompertz 之回歸參數表

參數 \ r (%)	5	10	15	20	25
a	0.0531	0.0995	0.1471	0.1951	0.2425
b	-0.2969	-0.2111	-0.1948	-0.198	-0.2091
X0	0.684	0.7111	0.7306	0.7548	0.7774
y0	-0.0002	-0.000045	-0.0002	-0.0003	-0.0006

表 3.3.4 角變量與建築物損壞程度(Bjerrum [a])

Category of potential damage	η
First cracking of panel wall	1/300
Tilting of high rigid building become visible	1/250
Considerable cracking of panel and brick walls Danger of structural damage to general building Safe limit for flexible brick walls, L/H> 4[b]	1/150
[a] after Wahls (1981), [b] Safe limits include a factor of safety	

表 3.3.5 L_{x1}/H(斷層傾角=60°)

fault	1/150				1/250				1/300			
tip=0	1g	10g	40g	80g	1g	10g	40g	80g	1g	10g	40g	80g
1.25	0.23	0.00	-0.18	-0.21	0.09	-0.14	-0.32	-0.35	0.04	-0.19	-0.37	-0.40
2.50	0.08	-0.10	-0.25	-0.27	-0.08	-0.27	-0.41	-0.44	-0.14	-0.33	-0.47	-0.49
3.75	-0.02	-0.17	-0.27	-0.28	-0.18	-0.33	-0.43	-0.44	-0.24	-0.38	-0.49	-0.50
5.00	-0.07	-0.16	-0.23	-0.25	-0.21	-0.30	-0.37	-0.39	-0.26	-0.35	-0.42	-0.44
6.25	-0.02	-0.10	-0.16	-0.17	-0.14	-0.22	-0.28	-0.29	-0.18	-0.26	-0.32	-0.33
7.50	-0.01	-0.09	-0.14	-0.15	-0.11	-0.19	-0.25	-0.26	-0.15	-0.23	-0.29	-0.30
8.75	-0.04	-0.12	-0.19	-0.20	-0.15	-0.23	-0.30	-0.31	-0.19	-0.27	-0.34	-0.35
10.00	-0.01	-0.10	-0.16	-0.17	-0.12	-0.21	-0.26	-0.27	-0.15	-0.24	-0.30	-0.31
11.25	-0.03	-0.11	-0.16	-0.17	-0.13	-0.21	-0.26	-0.27	-0.16	-0.24	-0.30	-0.31
12.50	-0.06	-0.14	-0.20	-0.21	-0.17	-0.25	-0.31	-0.32	-0.20	-0.28	-0.34	-0.35
13.75	-0.09	-0.16	-0.21	-0.22	-0.20	-0.27	-0.32	-0.33	-0.23	-0.30	-0.35	-0.36
15.00	-0.14	-0.20	-0.25	-0.26	-0.25	-0.31	-0.36	-0.37	-0.29	-0.35	-0.40	-0.41
16.25	-0.13	-0.20	-0.25	-0.25	-0.23	-0.30	-0.35	-0.35	-0.27	-0.34	-0.39	-0.39
17.50	-0.11	-0.17	-0.22	-0.22	-0.21	-0.27	-0.32	-0.32	-0.25	-0.31	-0.36	-0.36
18.75	-0.13	-0.19	-0.24	-0.24	-0.23	-0.29	-0.34	-0.34	-0.27	-0.33	-0.38	-0.38
20.00	-0.15	-0.21	-0.24	-0.24	-0.25	-0.31	-0.35	-0.35	-0.28	-0.34	-0.38	-0.38
21.25	-0.15	-0.21	-0.24	-0.25	-0.25	-0.31	-0.34	-0.35	-0.29	-0.34	-0.38	-0.39
22.50	-0.18	-0.23	-0.26	-0.27	-0.28	-0.33	-0.36	-0.37	-0.32	-0.37	-0.40	-0.41
23.75	-0.24	-0.28	-0.31	-0.32	-0.35	-0.39	-0.42	-0.43	-0.39	-0.43	-0.46	-0.47
25.00	-0.27	-0.31	-0.35	-0.36	-0.38	-0.43	-0.46	-0.47	-0.43	-0.47	-0.50	-0.51

表 3.3.6 L_{x2}/H(斷層傾角=60°)

r(%)	1/150				1/250				1/300			
	1g	10g	40g	80g	1g	10g	40g	80g	1g	10g	40g	80g
1.25	0.23	0.00	-0.18	-0.21	0.09	-0.14	-0.32	-0.35	0.04	-0.19	-0.37	-0.40
2.50	0.08	-0.10	-0.25	-0.27	-0.08	-0.27	-0.41	-0.44	-0.14	-0.33	-0.47	-0.49
3.75	-0.02	-0.17	-0.27	-0.28	-0.18	-0.33	-0.43	-0.44	-0.24	-0.38	-0.49	-0.50
5.00	-0.07	-0.16	-0.23	-0.25	-0.21	-0.30	-0.37	-0.39	-0.26	-0.35	-0.42	-0.44
6.25	-0.02	-0.10	-0.16	-0.17	-0.14	-0.22	-0.28	-0.29	-0.18	-0.26	-0.32	-0.33
7.50	-0.01	-0.09	-0.14	-0.15	-0.11	-0.19	-0.25	-0.26	-0.15	-0.23	-0.29	-0.30
8.75	-0.04	-0.12	-0.19	-0.20	-0.15	-0.23	-0.30	-0.31	-0.19	-0.27	-0.34	-0.35
10.00	-0.01	-0.10	-0.16	-0.17	-0.12	-0.21	-0.26	-0.27	-0.15	-0.24	-0.30	-0.31
11.25	-0.03	-0.11	-0.16	-0.17	-0.13	-0.21	-0.26	-0.27	-0.16	-0.24	-0.30	-0.31
12.50	-0.06	-0.14	-0.20	-0.21	-0.17	-0.25	-0.31	-0.32	-0.20	-0.28	-0.34	-0.35
13.75	-0.09	-0.16	-0.21	-0.22	-0.20	-0.27	-0.32	-0.33	-0.23	-0.30	-0.35	-0.36
15.00	-0.14	-0.20	-0.25	-0.26	-0.25	-0.31	-0.36	-0.37	-0.29	-0.35	-0.40	-0.41
16.25	-0.13	-0.20	-0.25	-0.25	-0.23	-0.30	-0.35	-0.35	-0.27	-0.34	-0.39	-0.39
17.50	-0.11	-0.17	-0.22	-0.22	-0.21	-0.27	-0.32	-0.32	-0.25	-0.31	-0.36	-0.36
18.75	-0.13	-0.19	-0.24	-0.24	-0.23	-0.29	-0.34	-0.34	-0.27	-0.33	-0.38	-0.38
20.00	-0.15	-0.21	-0.24	-0.24	-0.25	-0.31	-0.35	-0.35	-0.28	-0.34	-0.38	-0.38
21.25	-0.15	-0.21	-0.24	-0.25	-0.25	-0.31	-0.34	-0.35	-0.29	-0.34	-0.38	-0.39
22.50	-0.18	-0.23	-0.26	-0.27	-0.28	-0.33	-0.36	-0.37	-0.32	-0.37	-0.40	-0.41
23.75	-0.24	-0.28	-0.31	-0.32	-0.35	-0.39	-0.42	-0.43	-0.39	-0.43	-0.46	-0.47
25.00	-0.27	-0.31	-0.35	-0.36	-0.38	-0.43	-0.46	-0.47	-0.43	-0.47	-0.50	-0.51

表 3.3.7 L_p/H 影響長度

dip angle	r(%)					
	2.5	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0
22.5	0.729	0.833	1.035	1.230	1.417	1.597
30.0	0.659	0.748	0.918	1.077	1.227	1.366
37.5	0.596	0.676	0.826	0.963	1.087	1.198
45.0	0.536	0.610	0.746	0.867	0.972	1.062
52.5	0.478	0.548	0.674	0.782	0.872	0.944
60.0	0.421	0.488	0.606	0.703	0.780	0.836
67.5	0.365	0.429	0.540	0.628	0.693	0.735
75.0	0.309	0.371	0.476	0.556	0.610	0.639
82.5	0.253	0.314	0.414	0.485	0.529	0.544
90.0	0.198	0.257	0.351	0.415	0.449	0.451

表 3.3.8 L_s/H 影響長度

dip angle	r(%)					
	2.5	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0
22.5	-0.774	-0.800	-0.856	-0.917	-0.984	-1.057
30	-0.734	-0.768	-0.841	-0.922	-1.010	-1.105
37.5	-0.687	-0.723	-0.801	-0.888	-0.985	-1.091
45	-0.638	-0.672	-0.748	-0.836	-0.935	-1.045
52.5	-0.586	-0.617	-0.689	-0.773	-0.871	-0.981
60	-0.534	-0.561	-0.625	-0.704	-0.798	-0.906
67.5	-0.481	-0.502	-0.558	-0.631	-0.720	-0.825
75	-0.427	-0.444	-0.490	-0.555	-0.638	-0.740
82.5	-0.373	-0.384	-0.421	-0.477	-0.554	-0.652
90	-0.320	-0.324	-0.351	-0.399	-0.470	-0.563

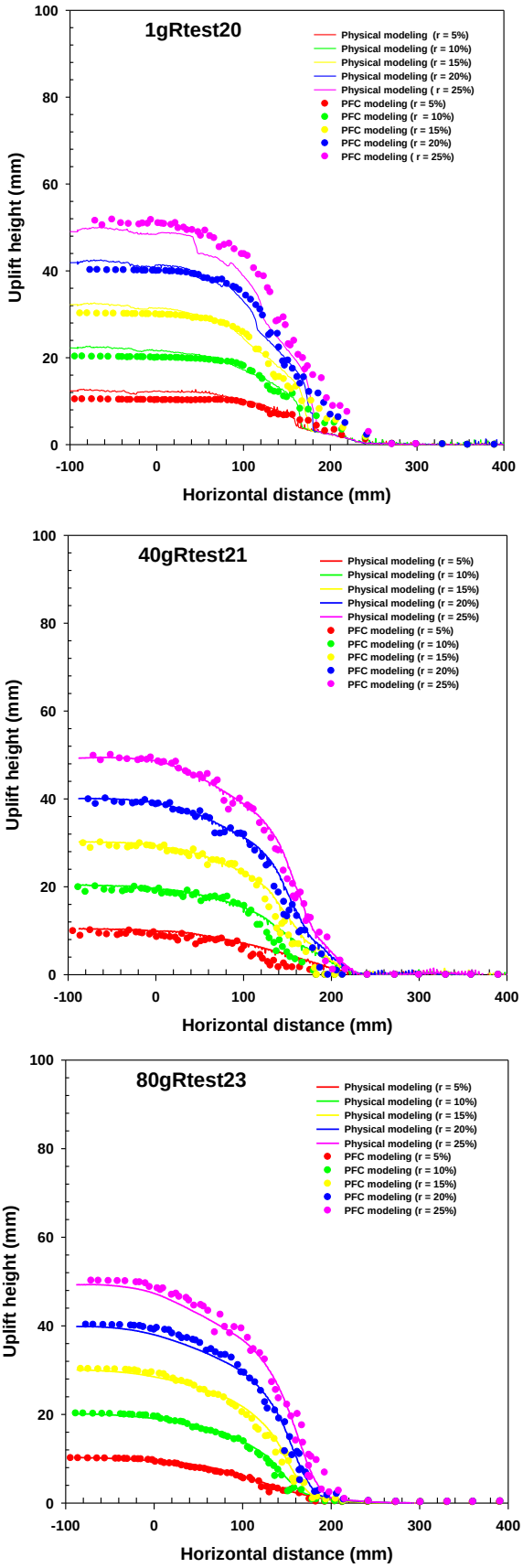


圖 3.3.8 為利用 PFC2D 在不同 g 值(1g,40g,80g)下，進行逆斷層錯動試驗的數值模擬，在不同的垂直錯動比(r)計算所得之地表剖面與離心模型試驗結果之比對

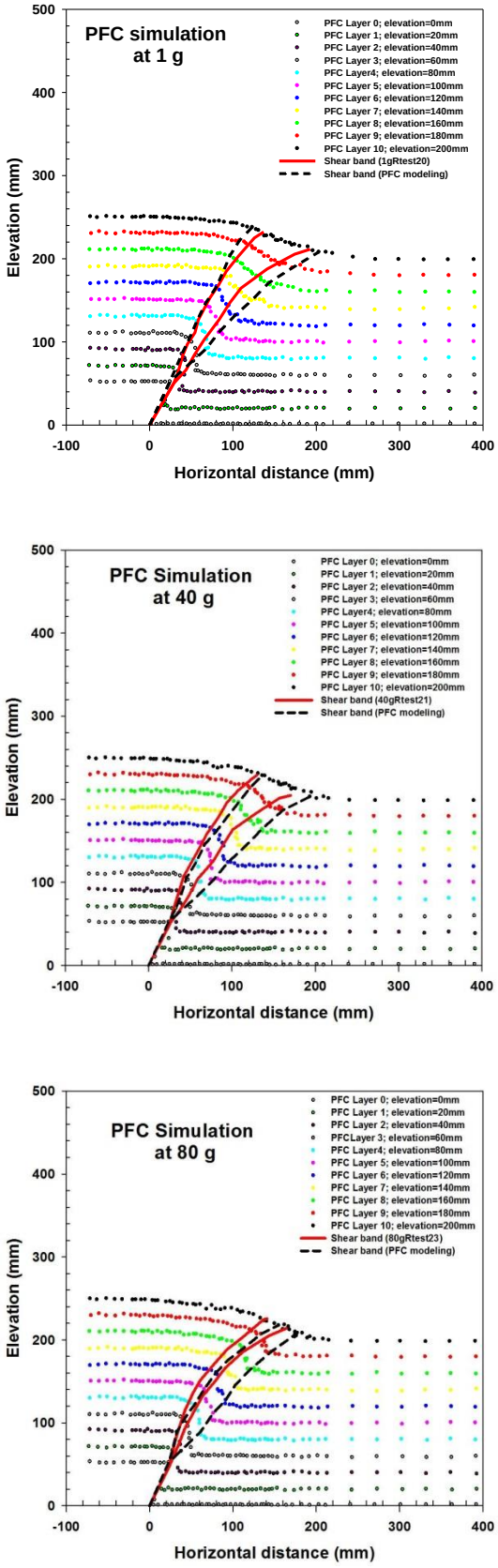
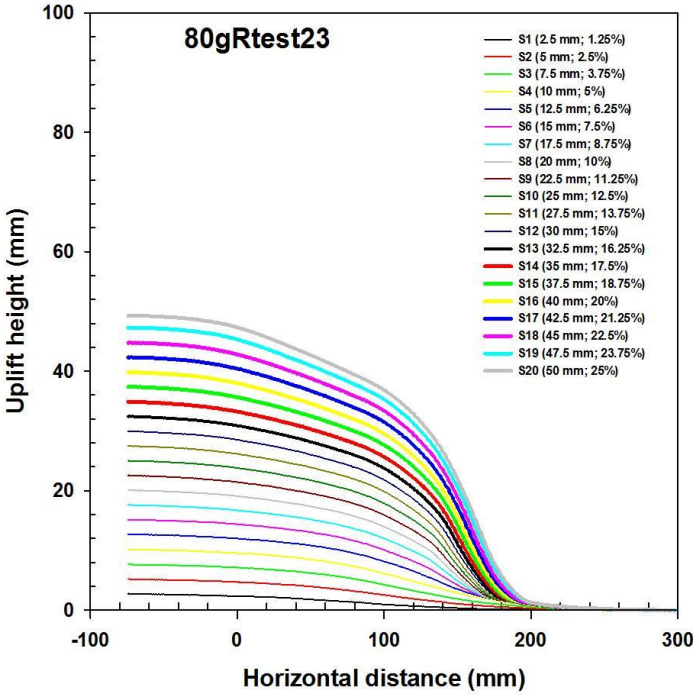
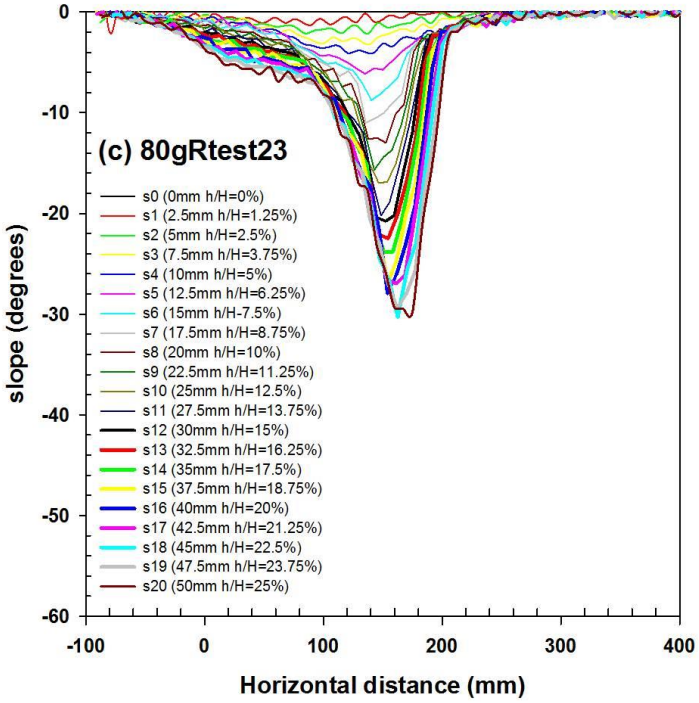


圖 3.3.9 利用 PFC2D 在不同 g 值(1g,40g,80g)下，進行逆斷層錯動試驗的數值模擬，計算所得之地下破裂跡與離心模型試驗地下破裂跡結果之比對



(a)地表變位剖面



(b)地表變位剖面的斜率

圖 3.3.10 80g 逆斷層離心模型試驗在不同的垂直錯動比(r)之地表變位剖面及地表變位剖面的斜率

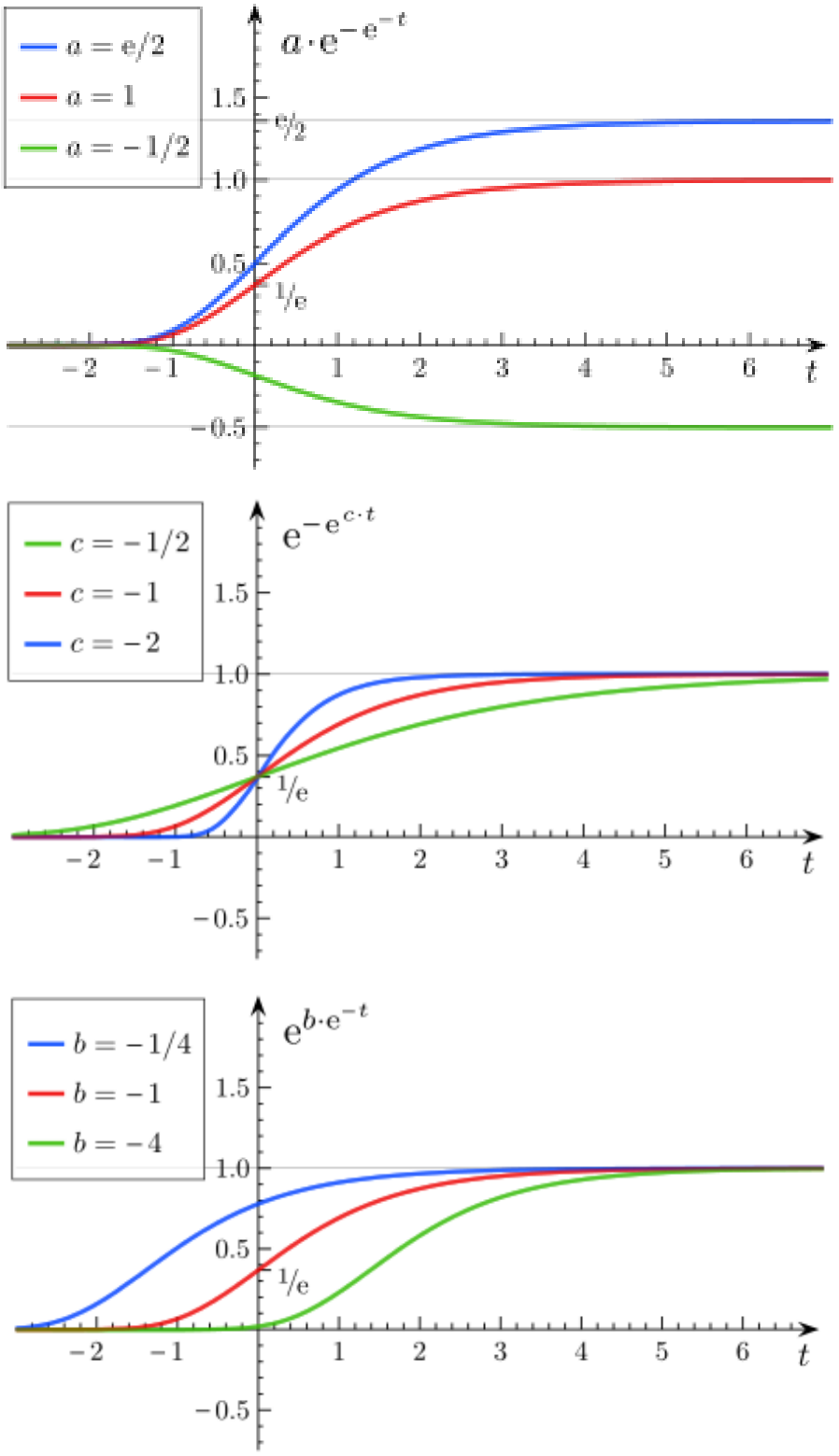


圖 3.3.11 Gompertz 函數三個變數的改變對曲線形狀及大小的影響示意圖

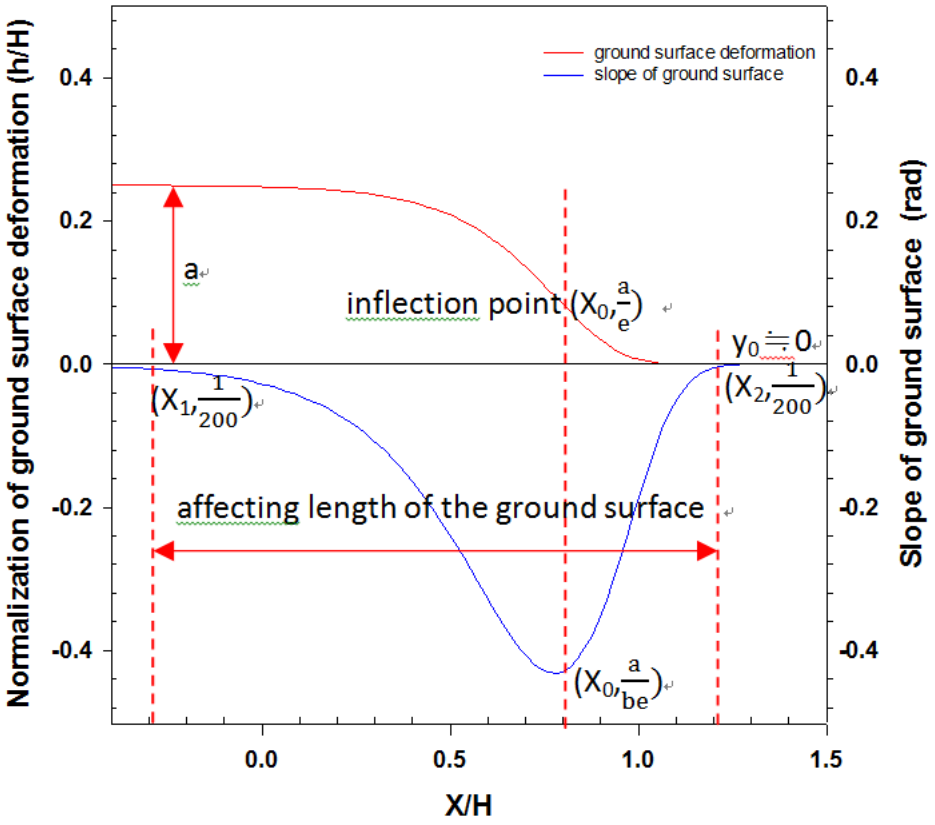


圖 3.3.12 利用 Gompertz 函數來描述地表變形剖面及斜率之示意圖

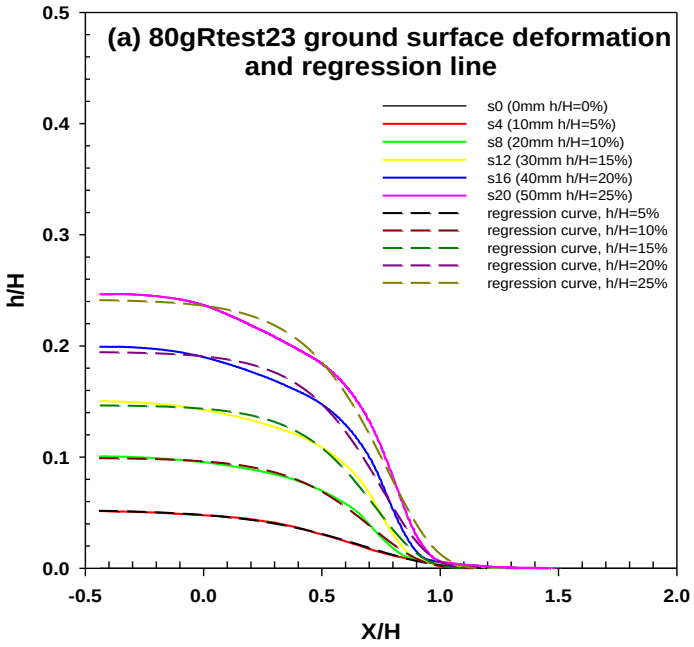


圖 3.3.13 逆斷層離心物理模型試驗與 Gompertz 之回歸比較圖

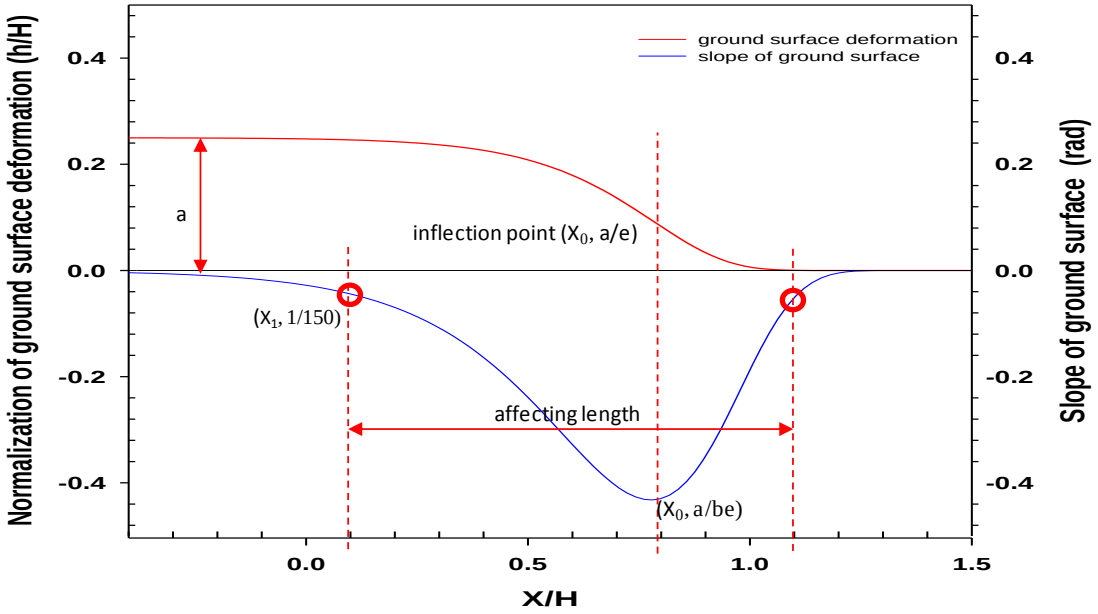
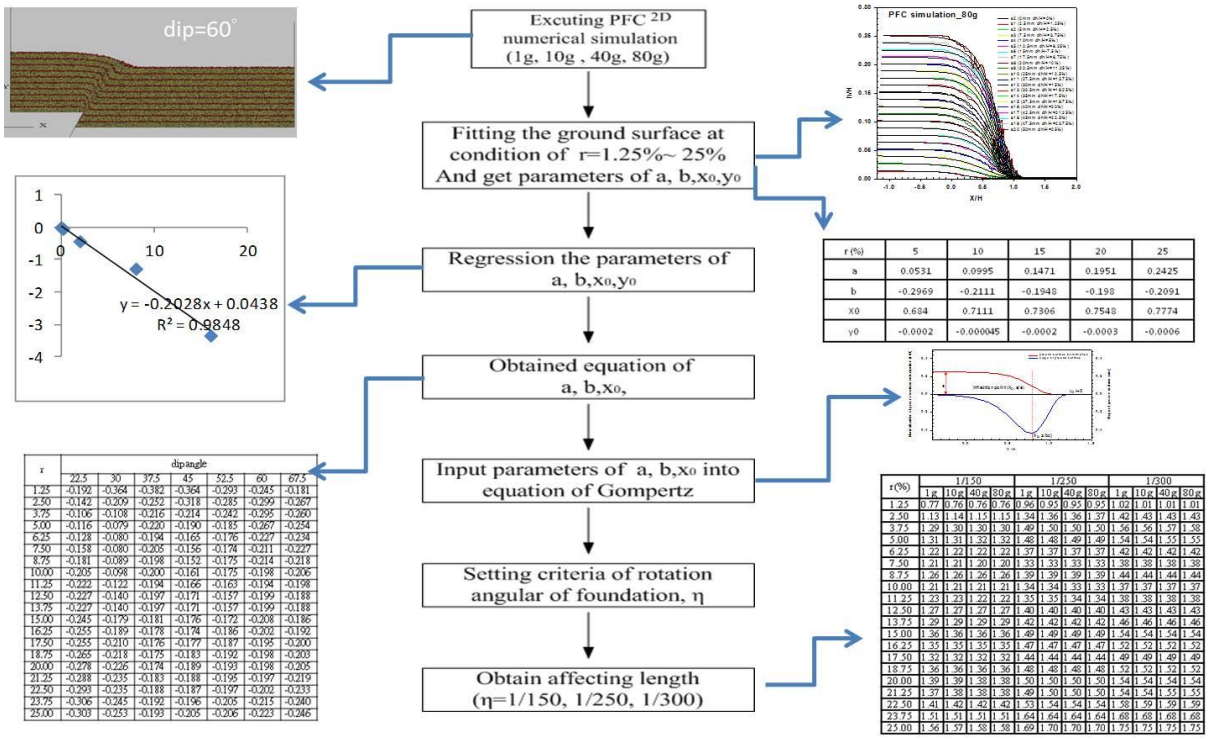


圖 3.3.14 逆斷層錯動後地表影響範圍之示意圖



r (%)	5	10	15	20	25
a	0.0531	0.0995	0.1471	0.1951	0.2425
b	-0.2969	-0.2111	-0.1948	-0.198	-0.2091
X0	0.684	0.7111	0.7306	0.7548	0.7774
y0	-0.0002	-0.000045	-0.0002	-0.0003	-0.0006

r	dip angle						
	22.5	30	37.5	45	52.5	60	67.5
1.25	-0.192	-0.364	-0.382	-0.364	-0.293	-0.245	-0.181
2.50	-0.142	-0.209	-0.252	-0.318	-0.285	-0.299	-0.267
3.75	-0.106	-0.108	-0.216	-0.214	-0.242	-0.295	-0.260
5.00	-0.116	-0.079	-0.220	-0.190	-0.185	-0.267	-0.254
6.25	-0.128	-0.080	-0.194	-0.165	-0.176	-0.227	-0.234
7.50	-0.158	-0.080	-0.205	-0.156	-0.174	-0.211	-0.227
8.75	-0.181	-0.089	-0.198	-0.152	-0.175	-0.214	-0.218
10.00	-0.205	-0.098	-0.200	-0.161	-0.175	-0.198	-0.206
11.25	-0.222	-0.122	-0.194	-0.166	-0.163	-0.194	-0.198
12.50	-0.227	-0.140	-0.197	-0.171	-0.157	-0.199	-0.188
13.75	-0.227	-0.140	-0.197	-0.171	-0.157	-0.199	-0.188
15.00	-0.245	-0.179	-0.181	-0.176	-0.172	-0.208	-0.186
16.25	-0.255	-0.189	-0.178	-0.174	-0.186	-0.202	-0.192
17.50	-0.255	-0.210	-0.176	-0.177	-0.187	-0.195	-0.200
18.75	-0.265	-0.218	-0.175	-0.183	-0.192	-0.198	-0.203
20.00	-0.278	-0.226	-0.174	-0.189	-0.193	-0.198	-0.205
21.25	-0.288	-0.235	-0.183	-0.188	-0.195	-0.197	-0.219
22.50	-0.293	-0.235	-0.188	-0.187	-0.197	-0.202	-0.233
23.75	-0.306	-0.245	-0.192	-0.196	-0.205	-0.215	-0.240
25.00	-0.303	-0.253	-0.193	-0.205	-0.206	-0.223	-0.246

r(%)	1/150				1/250				1/300			
	1 g	10 g	40 g	80 g	1 g	10 g	40 g	80 g	1 g	10 g	40 g	80 g
1.25	0.77	0.76	0.76	0.76	0.96	0.95	0.95	0.95	1.02	1.01	1.01	1.01
2.50	1.13	1.14	1.15	1.15	1.34	1.36	1.36	1.37	1.42	1.43	1.43	1.43
3.75	1.29	1.30	1.30	1.30	1.49	1.50	1.50	1.50	1.56	1.56	1.57	1.58
5.00	1.31	1.31	1.32	1.32	1.48	1.48	1.49	1.49	1.54	1.54	1.55	1.55
6.25	1.22	1.22	1.22	1.22	1.37	1.37	1.37	1.37	1.42	1.42	1.42	1.42
7.50	1.21	1.21	1.20	1.20	1.33	1.33	1.33	1.33	1.38	1.38	1.38	1.38
8.75	1.26	1.26	1.26	1.26	1.39	1.39	1.39	1.39	1.44	1.44	1.44	1.44
10.00	1.21	1.21	1.21	1.21	1.34	1.34	1.33	1.33	1.37	1.37	1.37	1.37
11.25	1.23	1.23	1.22	1.22	1.35	1.35	1.34	1.34	1.38	1.38	1.38	1.38
12.50	1.27	1.27	1.27	1.27	1.40	1.40	1.40	1.40	1.43	1.43	1.43	1.43
13.75	1.29	1.29	1.29	1.29	1.42	1.42	1.42	1.42	1.46	1.46	1.46	1.46
15.00	1.36	1.36	1.36	1.36	1.49	1.49	1.49	1.49	1.54	1.54	1.54	1.54
16.25	1.35	1.35	1.35	1.35	1.47	1.47	1.47	1.47	1.52	1.52	1.52	1.52
17.50	1.32	1.32	1.32	1.32	1.44	1.44	1.44	1.44	1.49	1.49	1.49	1.49
18.75	1.36	1.36	1.36	1.36	1.48	1.48	1.48	1.48	1.52	1.52	1.52	1.52
20.00	1.39	1.39	1.38	1.38	1.50	1.50	1.50	1.50	1.54	1.54	1.54	1.54
21.25	1.37	1.38	1.38	1.38	1.49	1.50	1.50	1.50	1.54	1.54	1.55	1.55
22.50	1.41	1.42	1.42	1.42	1.53	1.54	1.54	1.54	1.58	1.59	1.59	1.59
23.75	1.51	1.51	1.51	1.51	1.64	1.64	1.64	1.64	1.68	1.68	1.68	1.68
25.00	1.56	1.57	1.58	1.58	1.69	1.70	1.70	1.70	1.75	1.75	1.75	1.75

圖 3.3.15 求取地表影響範圍流程圖

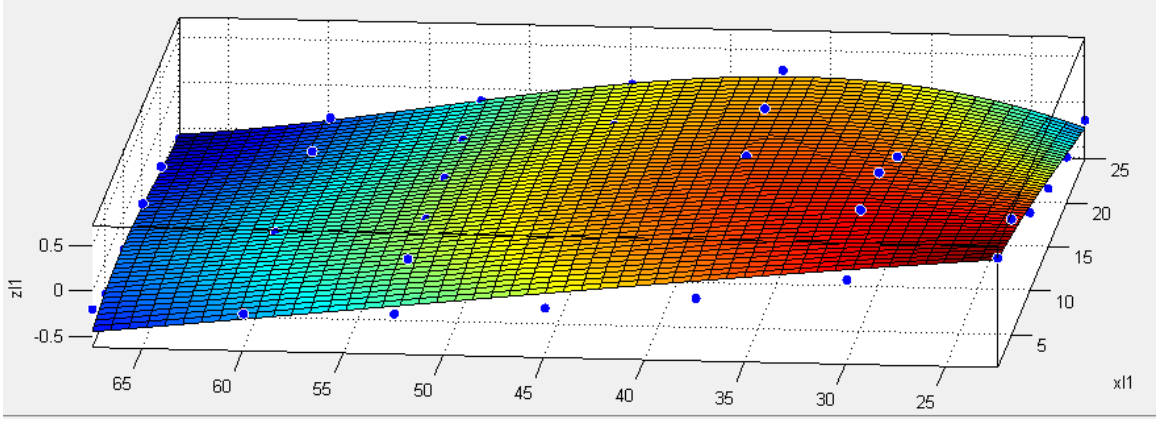


圖 3.3.16 L_{x1}/H Matlab SFtoo 圖

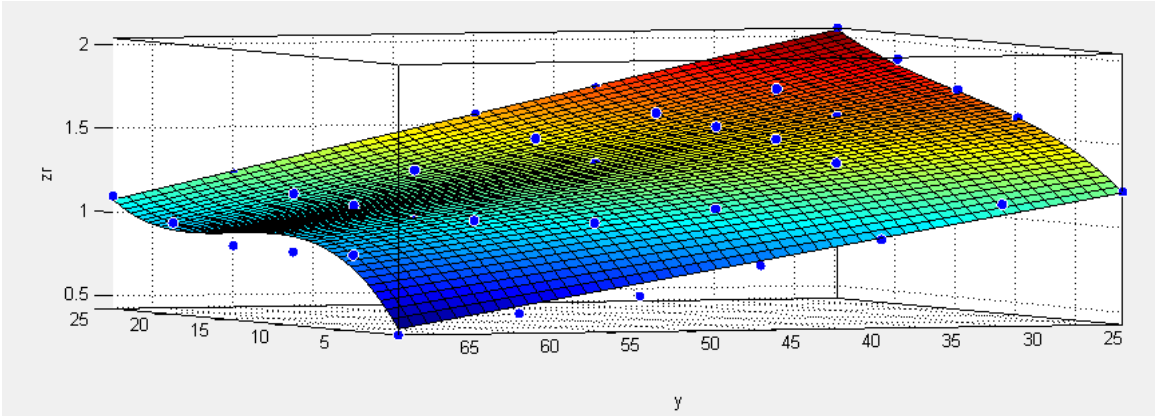


圖 3.3.17 L_{x2}/H Matlab SFtool 圖

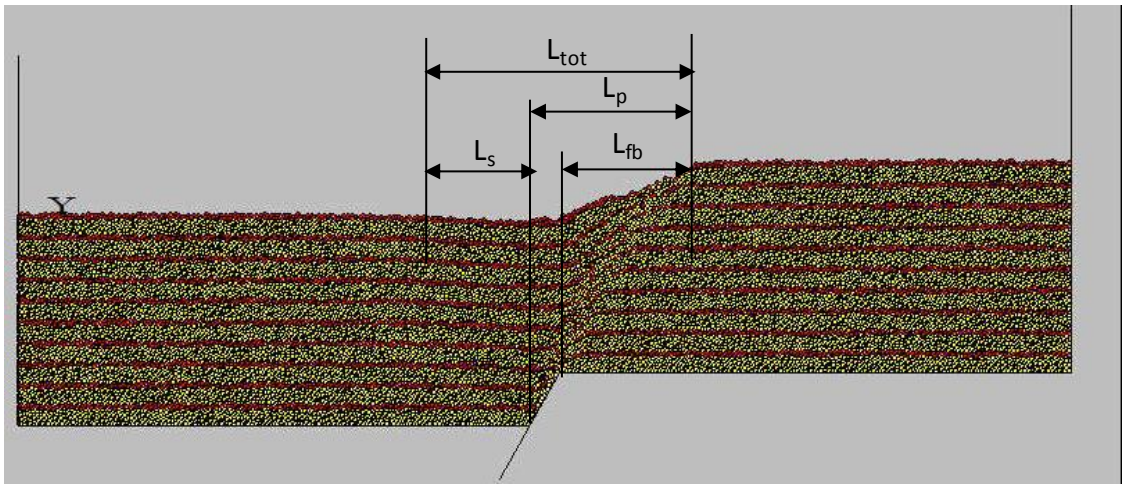


圖 3.3.18 正斷層影響範圍圖

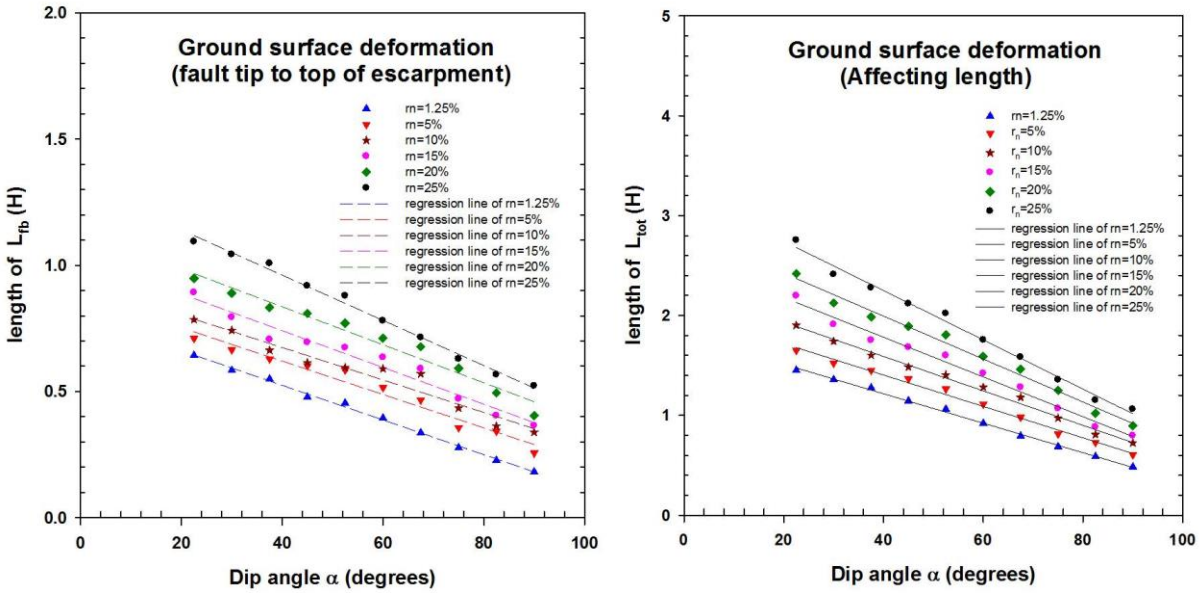


圖 3.3.19 正斷層影響範圍(a)L_{fb} 與斷層傾角關係，(b)L_{tot} 與斷層傾角關係

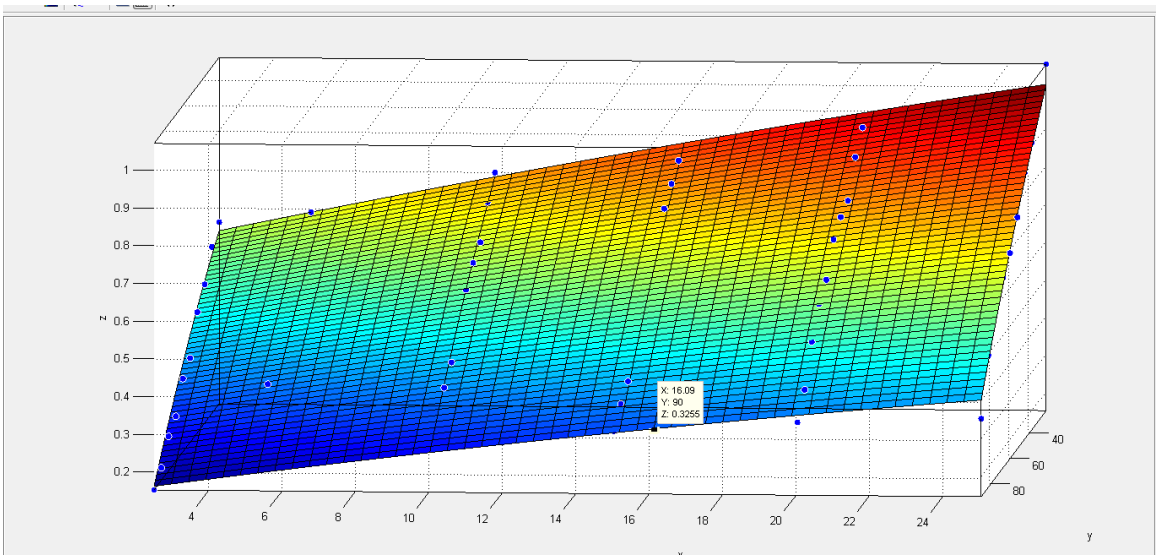


圖 3.3.20 Matlab SFtool 回歸示意圖

3.3.4.2 生長斷層

由於山腳斷層上盤之基盤深度 675m(五股剖面)，與砂箱數值模擬之尺度有很大的差異，因此本研究在山腳斷層的數值模擬中，進行了兩項模擬方式上的改量，說明如下：

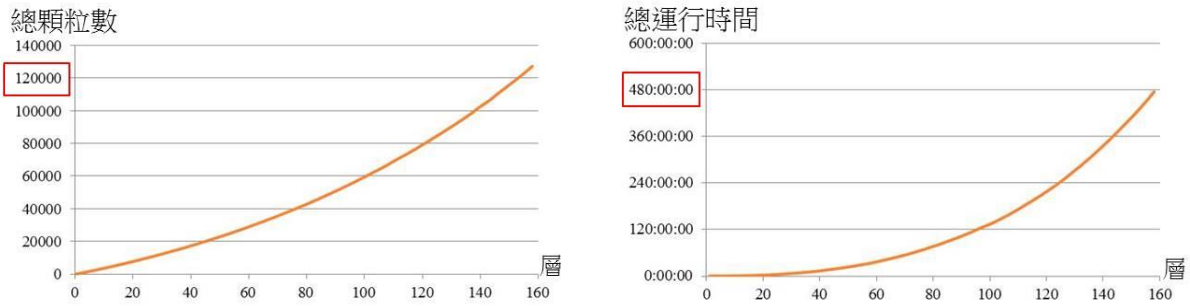
1. 由於 169 層時的模擬範圍寬度(500m)為砂箱寬度(1m)的 500 倍，若此數值模擬所使用與砂箱數值模擬相同之顆粒粒徑的話，所產生的顆粒數將是砂箱數值模擬的2.5×10^5倍，此顆粒數之運算量已超過現今電腦之負荷。因此本研究將生長斷層數值模擬之顆粒粒徑放大 250 倍(0.7、0.8、0.9 及 1m 四種顆粒粒徑)以符合電腦之運算容量。即使如此，運行 169 層生長斷層所使用到之總顆粒數仍超過 12 萬顆，運行時間超過 480 小時，如圖 3.3.21 所示。
2. 由於 169 層時的上盤厚度(136m)約為顆粒粒徑(0.7~1m)的 300 倍，當此數值模擬所使用之顆粒勁度全部一樣時，越底層之顆粒會壓密的越厲害，孔隙率也越小(圖 3.3.22(a))，雖然此一現象與地質現象相同，但會造成兩個問題：一是底層顆粒承受不住上層顆粒的重量，而開始產生顆粒穿牆的現象，如同砂箱實驗的漏砂現象。二是底層顆粒之勁度若與地表顆粒之勁度相同，則無法反應出越深的土層因壓密而造成強度越大的現象。因此，根據以上兩個原因，本研究在設定各生長層之勁度時，會依照該層在下盤之深度來修正其勁度，修正方式參照(Eq.2.4.10)，見表 2.4.2。當顆粒勁度隨深度改改時，模擬過程中就不會產生顆粒穿牆的現象(圖 3.3.22(b))。

改進了以上兩點之後，169 層之生長斷層數值模擬即可利進行，模擬結果如圖 3.3.23 所示為 169 層全貌，圖 3.3.24 為局部放大。由圖 3.3.24 之模擬結果可以看到每一層生長層的頂部在沉積完都是水平的，但隨著上盤持續陷落，原本的水平面會開始受到擾動。而出現錯移、傾斜，可以比較圖 3.3.3 的人工判識原則(2)、(3)，甚至，有些土層已經變形成垂直的走向，且原本在下的地層還有可能出現在上的現象，可以比較圖 3.3.3 的人工判識原則(1)、(2)中間所包圍的區域。以上現象明顯的呼應了劉桓吉(2000)及林宗朝(2001)所看到在 SCF-2 鑽孔裡所看到的擾動現象。

圖 3.3.25~圖 3.3.27 為自動判識與人工判識圈繪剪切帶的結果比較，每一張圖代表了不同的橢圓率門檻值。由比較結果可以看到，雖然自動判識是藉由一次性的應變在做圈繪，而人工判識是藉由累積的應變在做圈繪，但兩者所圈繪出來的剪切帶很相近，也就是代表了當下一次斷層錯動來臨時，生長斷層中的剪切帶總是會沿著既有的剪切帶發展。圖 3.3.25 所做用之橢圓率門檻值為粘為東(2010)所建議之 1.5(γ = 41%)，其結果在地表會出現寬約為 14 公尺之剪切帶。圖 3.3.26(橢圓率門檻值 1.1，γ = 9.5%)及圖 3.3.27(橢圓率門檻值 1.05，γ = 4.9%)之自動與人工判識結果最為相近，代表了當下一次斷層錯動來臨時，既有剪切帶內的剪應變量(γ)會落在大約 4.9%~9.5%的區間裡。而從圖 3.3.28(橢圓率門檻值 1.01，γ = 0.9%)的結果可以看到反向斷層的剪應變雖然不大、需要用較小的門檻值才觀察得到，但其剪切帶也是一樣沿著既有的反自斷層剪切帶在發展。

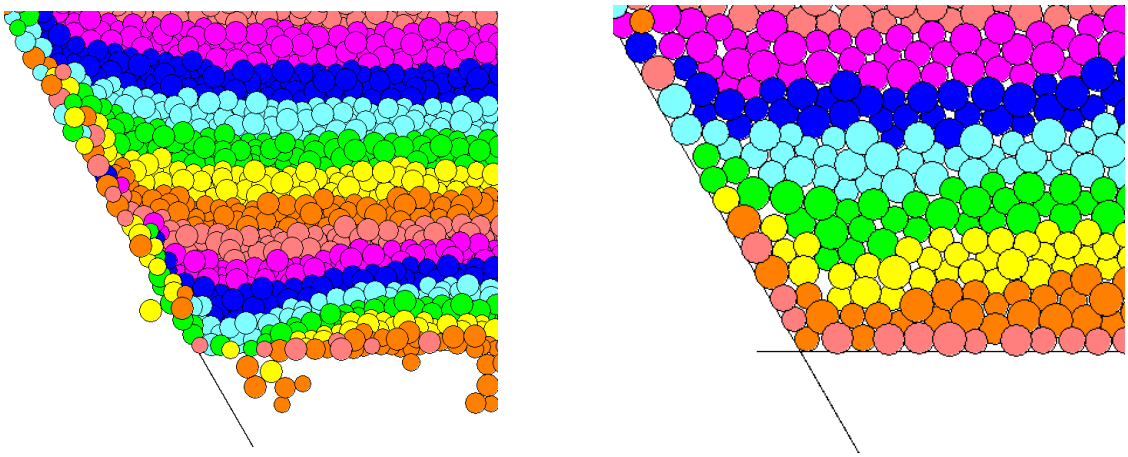
為了驗證以上在生長斷層中觀察到的現象的確是在生長斷層中才會出現，本研究也進行了一樣土層厚度(下盤 253.5m)，一樣微觀參數，但沒有生長斷層的正斷層數值模擬，如圖 3.3.29 所示。與 169 層生長斷層一樣錯動 2.5m，但由於此一模擬沒有累積應變，因此難以用人工判識的方式圈繪剪切帶，並且自動判識之橢圓率門檻值也必需小到 1.05(γ = 4.9%)才看得到剪切帶。由模擬結果可以看到，不含生長地層之剪切帶發展於基盤中斷層傾角的沿伸線上(60°)，但在 169 層生長斷層的結果中，剪切帶則會傾向下盤(47°)，與圖 3.3.27 比較。

另外，由模擬結果也可以看到不含生長地層的剪切帶集中在基盤破裂處及地表陷落處，並且其範圍明顯小於有生長地層的結果。此一結果說明雖然土壤顆粒的參數都一樣，但有生長斷層比沒有生長斷層更容易發展出剪切帶，其原因可以從顆粒的接觸力(Contact Force)來解釋，如圖 3.3.30 所示，在生長斷層中的土層有明顯的應力集中區及應力陰影區(Stress Shadow)，這些區域都位在剪切帶內，甚至連反向斷層的剪切帶內也可以清楚的看到，這些集中區及陰影區是土層受到 168 次錯動的擾動而造成的應力分布不均勻，並成為第 169 次錯動時的初始狀態；而在沒有生長斷層中的土層則沒有這樣的現象，應力的分布很均勻，因此兩者之間就會出現差異。



(a) (b)

圖 3.3.21 169 層生長斷層數值模擬所使用之顆粒數與運行時間



(a)顆粒勁度全部一樣 (b) 顆粒勁度隨深度改變

圖 3.3.22 比較顆粒勁度全部一樣與隨深度改變之生長斷層數值模擬

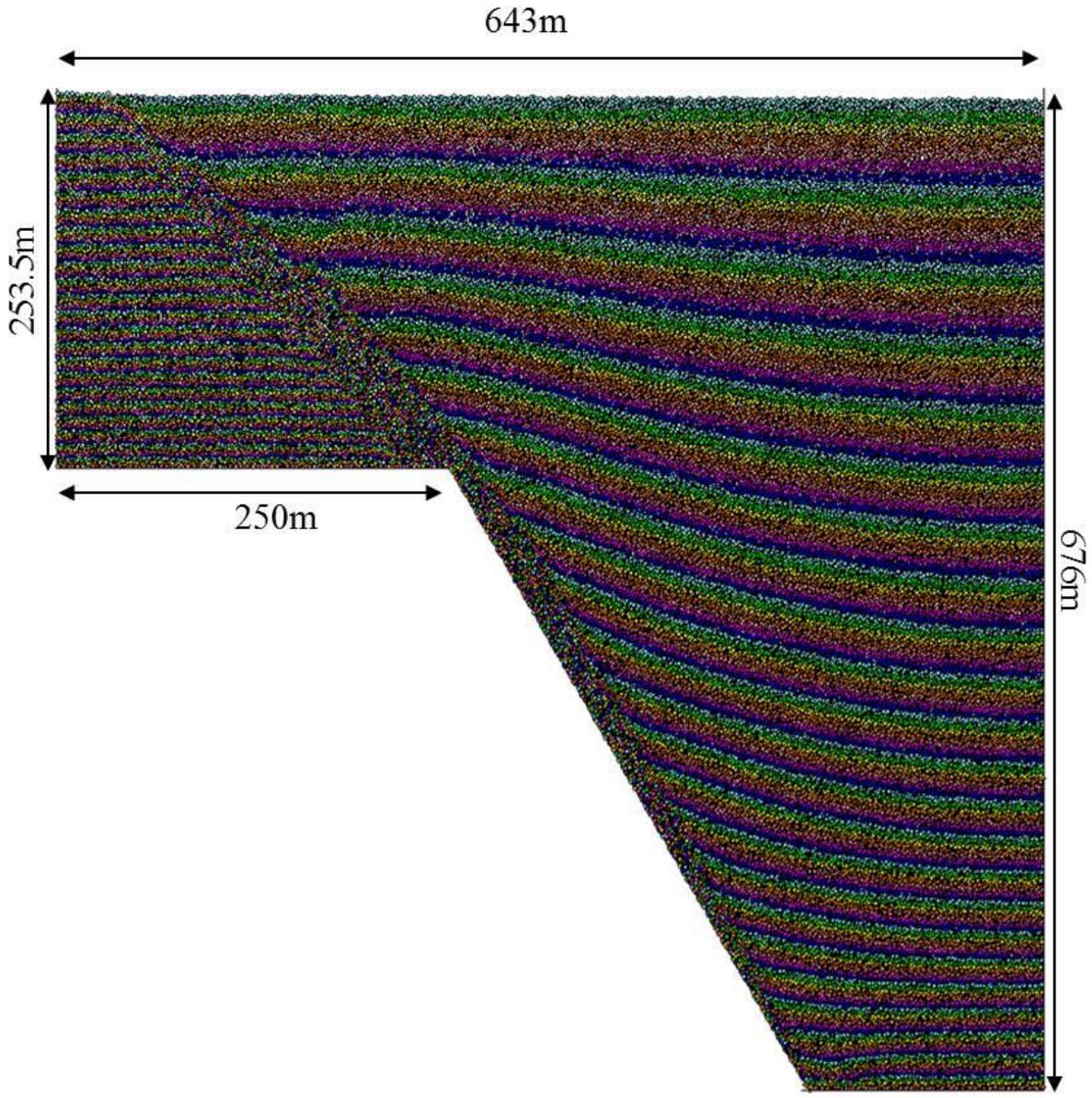


圖 3.3.23 169 層生長斷層數值模擬

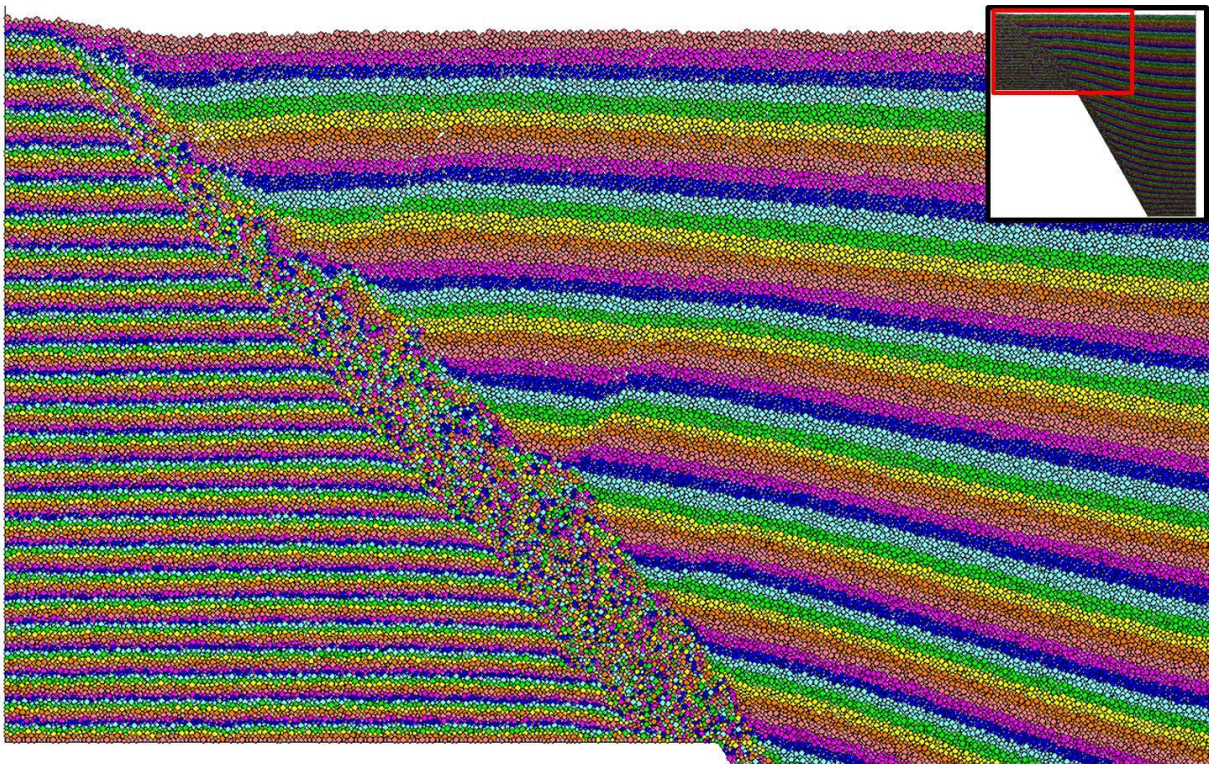


圖 3.3.24 169 層生長斷層數值模擬結果

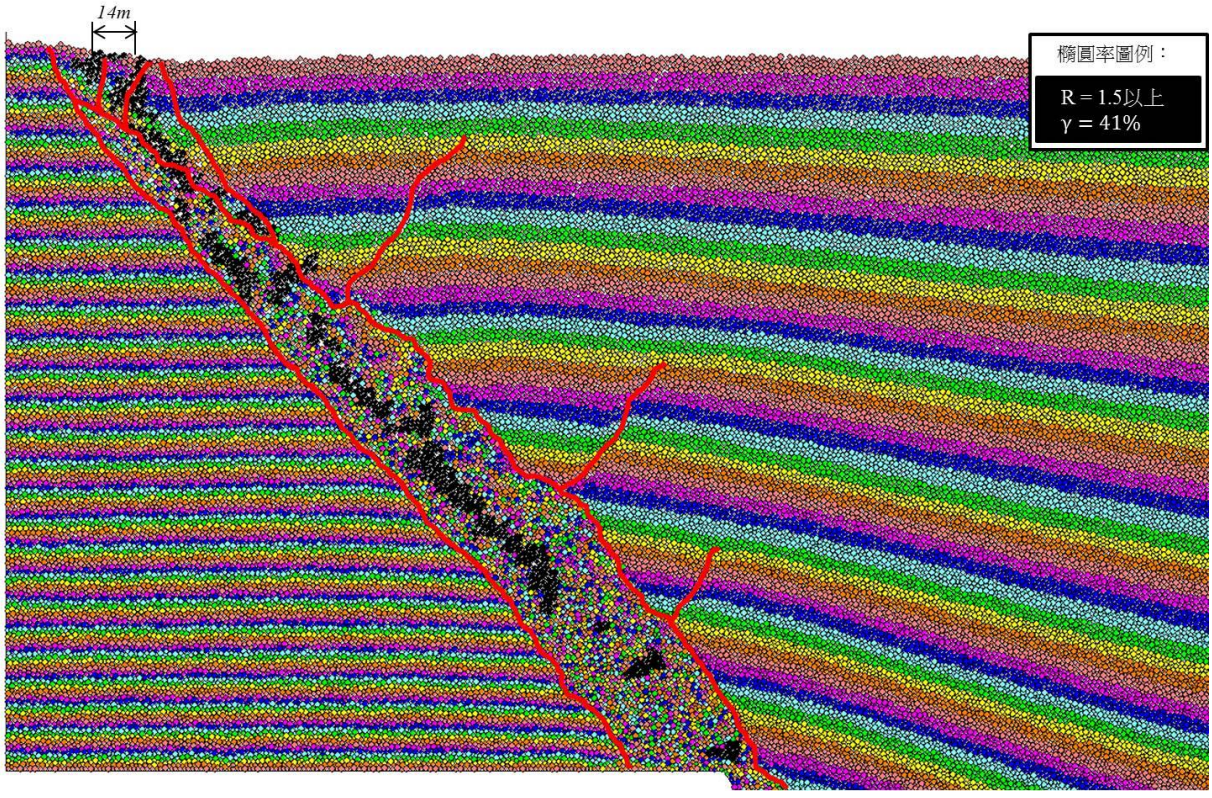


圖 3.3.25 169 層生長層錯動時所形成的剪切帶(橢圓率門檻值 1.5)

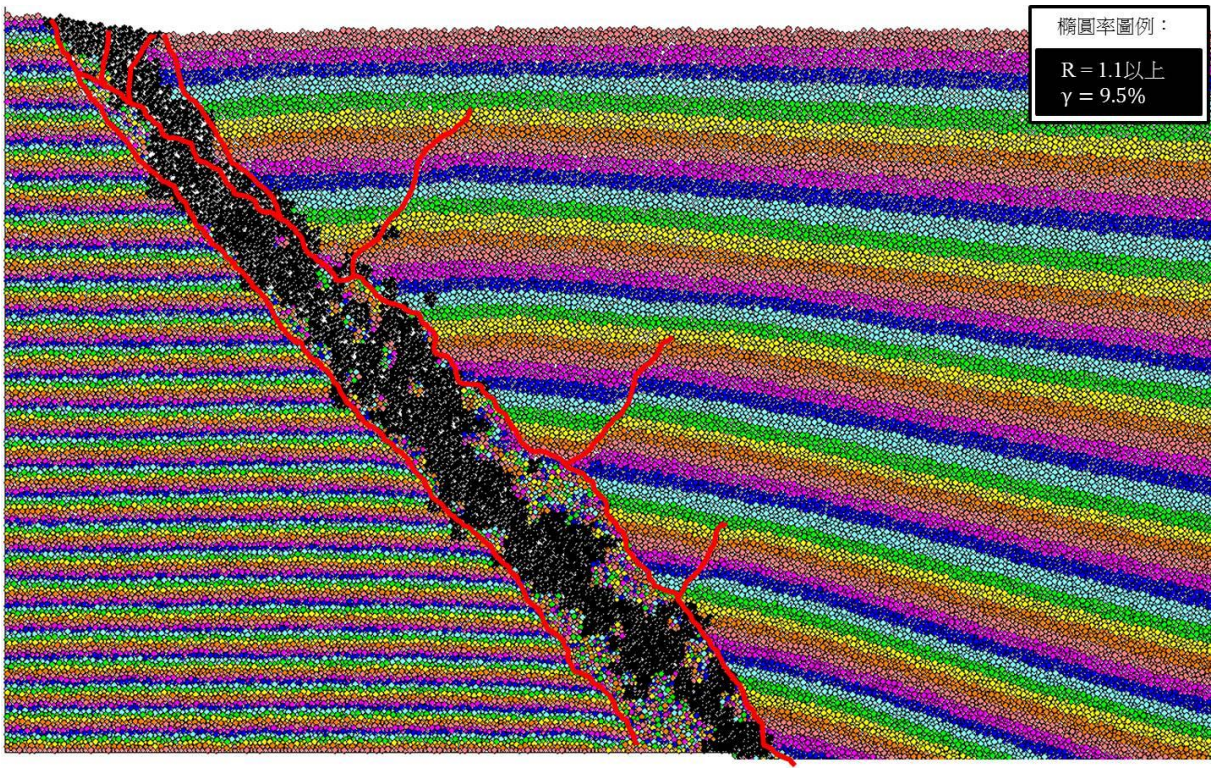


圖 3.3.26 169 層生長層錯動時所形成的剪切帶(橢圓率門檻值 1.1)

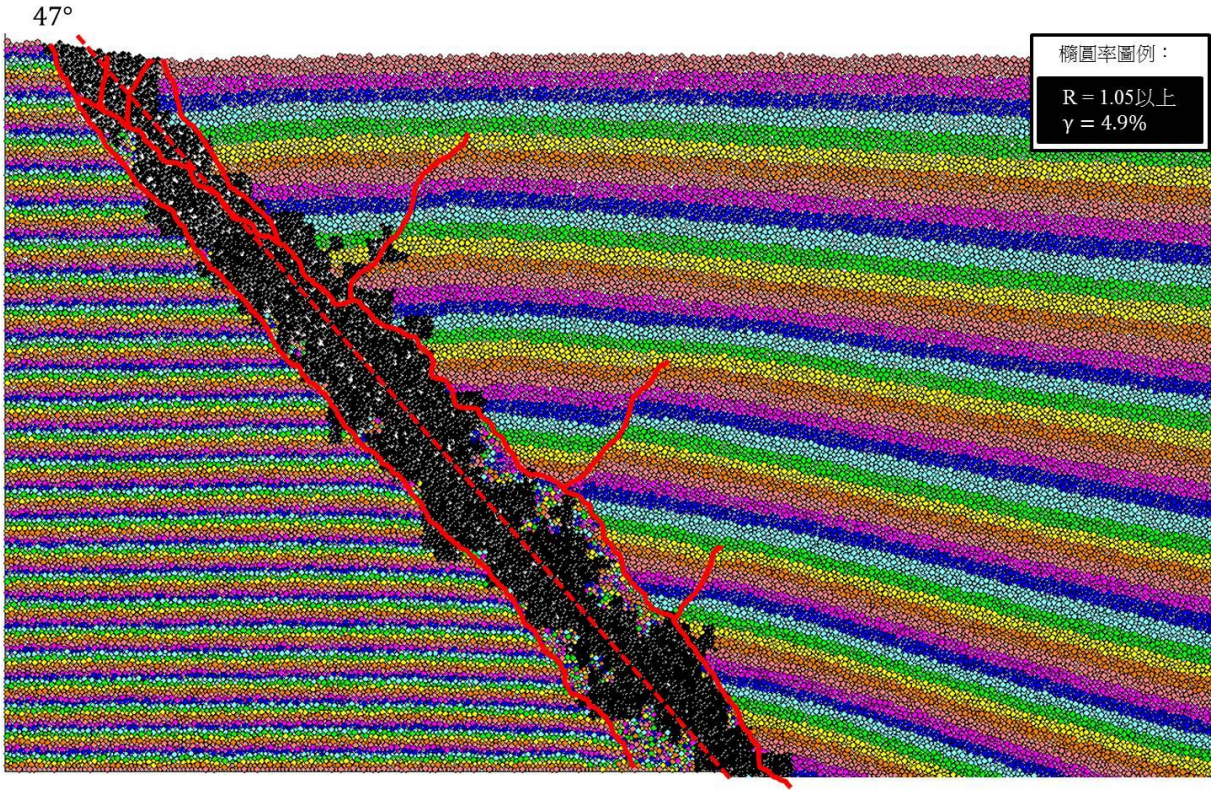


圖 3.3.27 169 層生長層錯動時所形成的剪切帶(橢圓率門檻值 1.05)

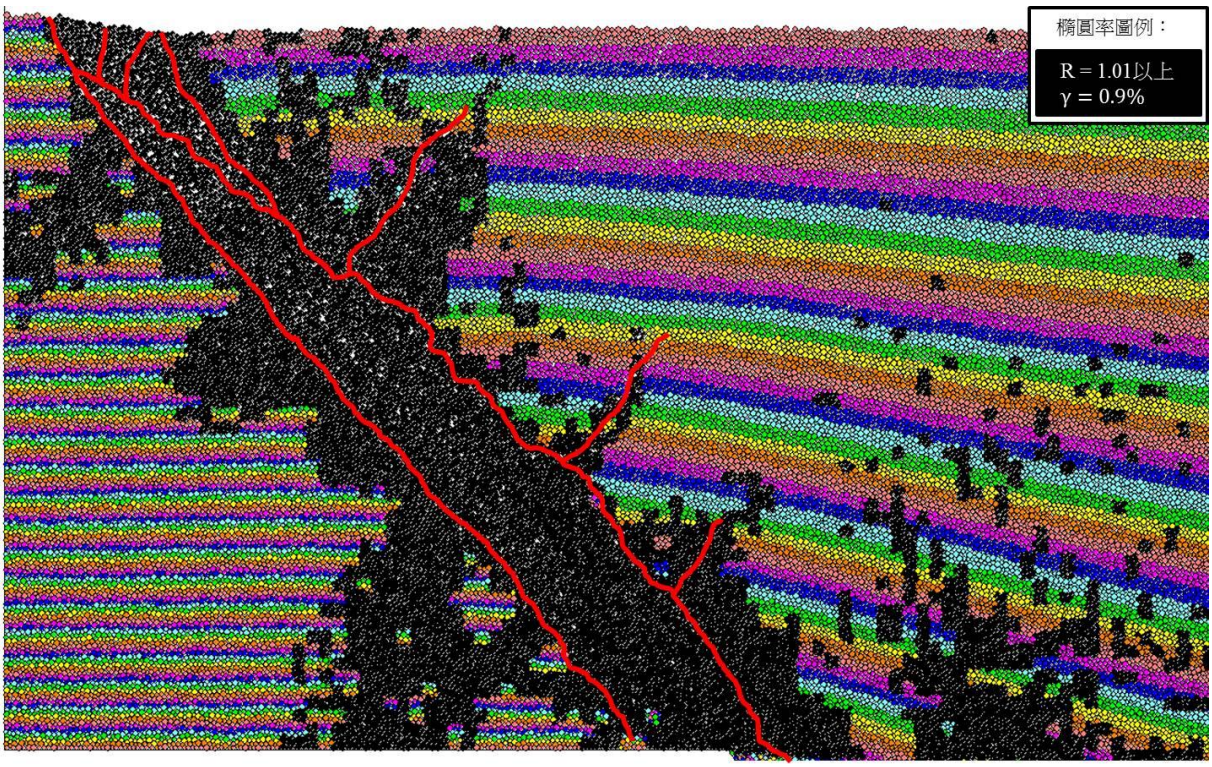


圖 3.3.28 169 層生長層錯動時所形成的剪切帶(橢圓率門檻值 1.01)

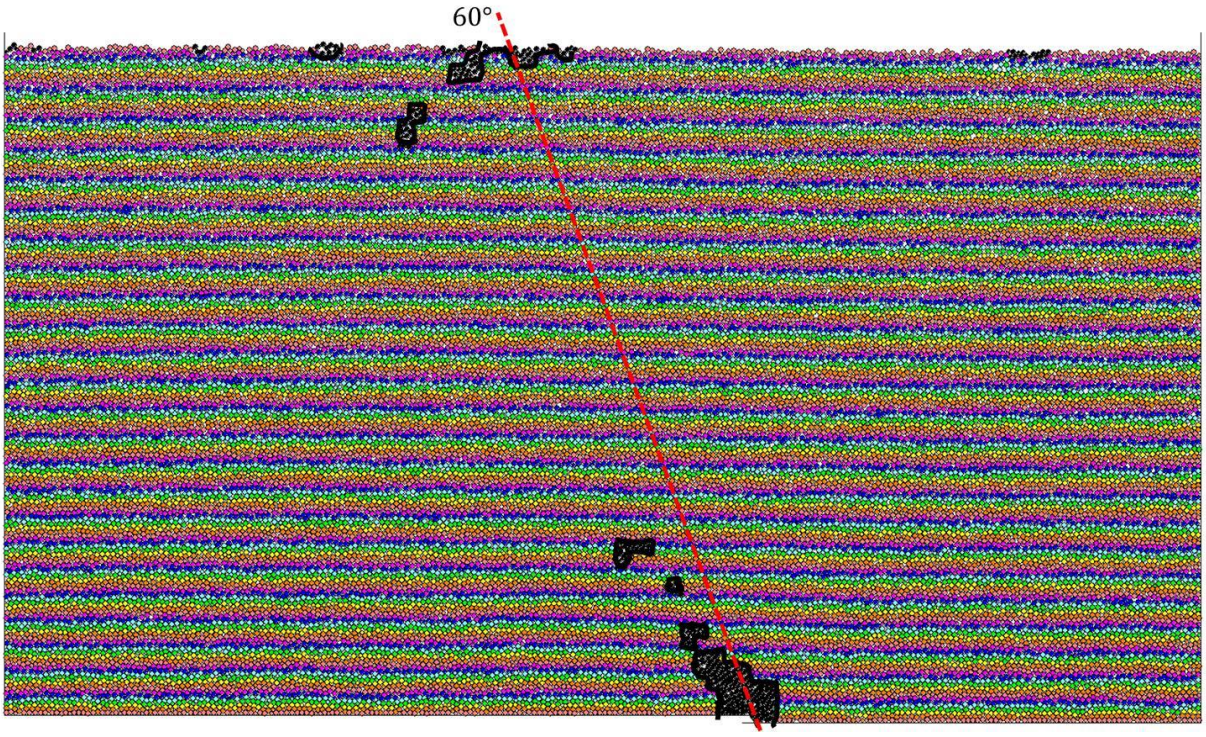
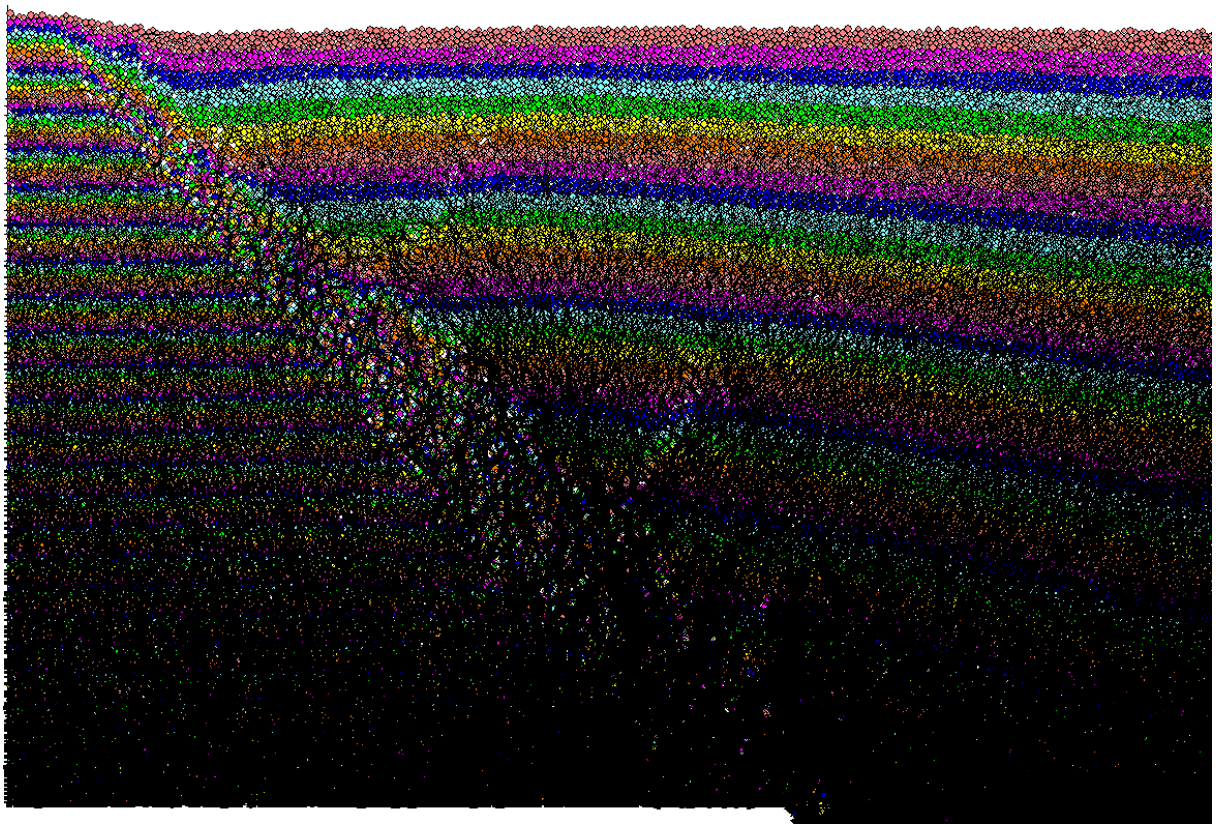
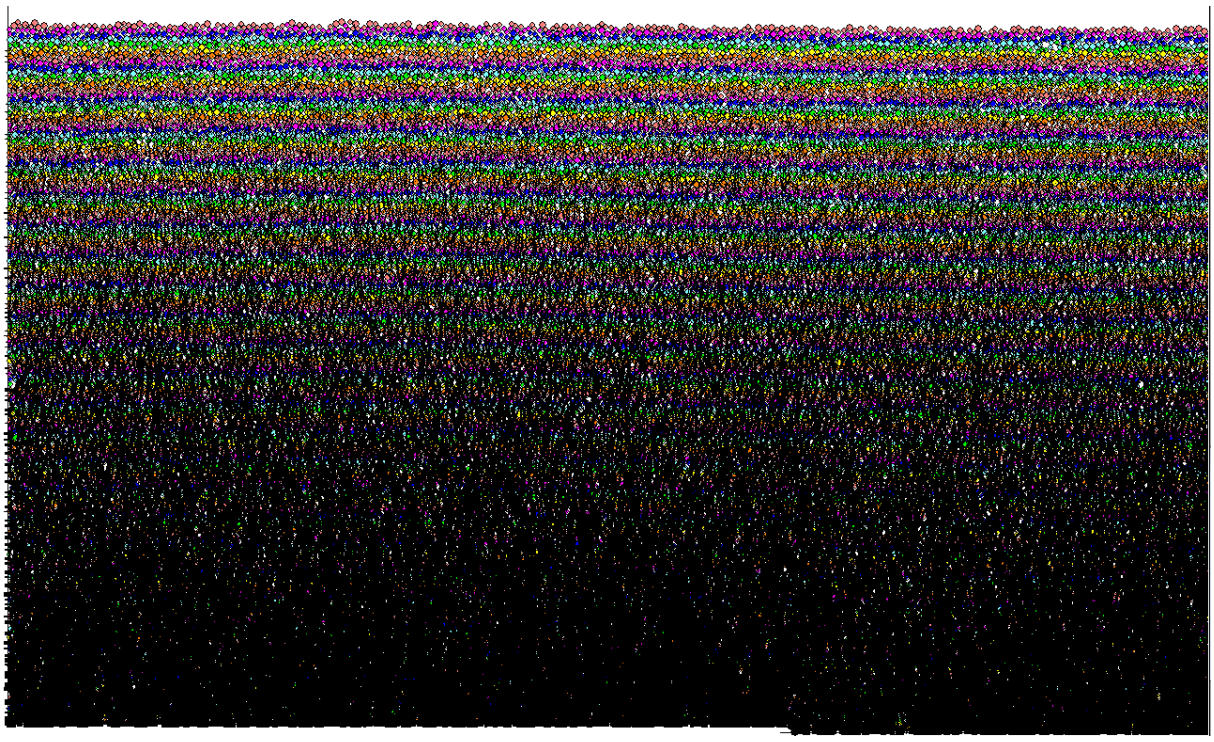


圖 3.3.29 與 169 層生長斷層比對之正斷層(相同微觀參數及下盤覆土厚度)



(a)169 層生長斷層



(b)與 169 層生長斷層比對之正斷層(相同微觀參數及下盤覆土厚度)

圖 3.3.30 169 層生長斷層及正斷層數值模擬之顆粒接觸力(Contact Force)分佈情形

第四章、結論與建議

4.1 現地調查

- 黑沃斷層

1. 黑沃斷層為一條寬約 1~5 公里的斷層帶中現今活躍的部份。這斷層帶為岩性的分界，西邊為 Franciscan 雜岩及東邊為 Coast Range 蛇綠岩系及 Great Valley Sequence 的沉積岩。
2. 黑沃斷層在地表上呈現一複雜的斷層帶，寬由數百公尺到數公里不等，第四紀以來的滑動速率為~9 mm/yr，約佔 SAF 系統的 1/4。
3. 最近一次沿此斷層錯動的地震事件為 1868 年，規模約為 6.8，再現週期為 161±65 年。
4. 於橫跨黑沃斷層的槽溝的垂直剖面，常見數條垂直或近乎垂直的斷層線跡，分佈於數公尺或十公尺左右的寬度範圍內。

- 米崙斷層

1. 1951 年發生花蓮地震，地震(米崙)斷層的地表錯動量，左移達 2 公尺，垂直抬升量達 1.2 公尺。
2. 根據目前之歸納推測，米崙斷層面呈高角度東傾，傾角 50-70 度之間。
3. 米崙斷層之建議簡化土層參數表請見表 3.1.3。

4.2 砂箱實驗

- 純砂土逆、正斷層無基礎離心模型試驗成果

逆斷層錯動時，主破裂面向下盤彎斜，隨著試驗 g 值的增加，剪切帶範圍愈窄，向下盤彎斜的角度也較小。

正斷層錯動時，首先由斷層尖端，在上盤發展出第一條接近垂直的破裂跡，並且在 r=2.5%左右到達地表，隨著試驗 g 值的增加，剪切帶範圍愈寬。

- 純黏土逆、正斷層無基礎離心模型試驗成果

越脆性之黏土試體(su=116kPa)有越明顯的垂直破裂面及較深及較寬的裂縫，但裂縫數量較少，地表變形的範圍也較窄；相反的，越有延展性之黏土試體(su=46kPa)的垂直破裂面越不明顯，地表變形的範圍也較寬，地表面的裂縫深度較淺，但有較多的裂縫發生在地表。相較於純砂土試體有較寬的變形範圍及較緩的坡度。

- 砂黏土互層正、逆斷層無基礎離心模型試驗成果

位於砂土層中之破裂跡，與純砂土之破裂跡類似。正斷層錯動試驗，砂及黏土界面之變形剖面形成台階的形貌。上覆砂層之試體不會產生地表裂縫，而且在坡腳處有較陡的坡度。砂土與黏土界面形成斷崖地形。砂黏土互層在水平方向有較平緩的破裂跡。

- 純砂土逆、正斷層與剛性淺基礎版的互制效應離心模型試驗成果

結構物的載重、寬度及相對位置(S/B)對土層中剪切帶的發展有很重大的影響，結構物載重越大，基礎旋轉角度越小；結構物寬度越大，基礎旋轉角度越小。

逆斷層錯動時，座落於上盤的剛性淺基礎(s/B=0)，有較大的水平位移、垂直頂升量及旋轉角，但上盤的土壤不會覆蓋在基礎版之上。座落於下盤的剛性淺基礎(s/B=1)，有較小的水平位移、垂直頂升量及旋轉角，但上盤的土壤會大量覆蓋在基礎版之上。座落於上盤(s/B=0)或座落於上下盤間(s/B=0.69)的剛性淺基礎，會導致下主破裂面容易向下盤彎斜發展，因此上下主破裂面的範圍也較寬。而座落於下盤的剛性淺基礎(s/B=1)，由於基礎版的垂直載重，增加了基礎版底下土壤的有效應力，造成下主破裂面不容易向下盤發展，上下主破裂面的範圍相較基礎座落在上盤者為小，甚至也較自由場之主破裂面範圍為小。

正斷層錯動時，不同垂直錯動量，自由場及 B 基礎版座落於 s/B=1 處，顯示淺基礎的存在，會大幅修飾地下破裂跡的發展及地表的變形剖面。

- 純砂土橫移模型試驗成果

橫移斷層錯動達1cm時地表有明顯破裂跡產生，且破裂方向與雷氏剪裂相同，其後破裂跡發育趨向平行斷層面，且貫穿砂盒；抬升作用也達到 1cm，地表高程差異顯著時，抬升側發生圓弧狀破裂跡，且砂顆粒由抬升側滑移至未抬升側。透過試驗可觀察，地表因斷層作用之破裂跡影響範圍，在錯動初期範圍最廣，錯動後期影響範圍並未擴張而是在既有影響範圍內產生新破裂跡。滑移量(Sy)與地表影響範圍(W)分別對覆土層厚度(H)正規化，含有一趨勢，當 Sy/H 在接近 1 前有一高峰值，影響範圍 W/H 最大達到 2.7，而主要影響範圍接落在 W/H 為 1.5 以內。

因砂盒抬升形成地形高差之崩崖與堆積的影響範圍，在地形高差較小時影響範圍不明顯，在地形高差較大時，相對抬升側形成明顯崩崖且向後發展，相對陷落側形成堆積區且向前發展。

4.3 數值模擬

- 微觀參數

對於直剪模擬試驗而言，先前進行之參數分析主要著重於無凝聚力之土壤，由於車籠埔斷層或米崙斷層等之現地土壤種類分佈也常見黏土等具凝聚力之材料，因此本年度之研究重點在於找出具凝聚力材料之力學參數與微觀參數之關係，以做為模擬斷層錯動之另一種材料。由表 4.3.1 的初步分析結果可以得知，平行鍵結之存在對於具凝聚力材料之 c, ϕ值有極大之貢獻，但就分析之結果而言，其摩擦角顯得過大，其原因可能就在於平行鍵結與滑動模式可同時存在，對於土壤來說較不合理；以接觸鍵結模擬具凝聚力材料之結果看來，如表 4.3.2 所示，其 c, ϕ值較為合理，且摩擦角ϕ不如平行鍵結之角度大，如同前述，接觸鍵結模式與滑動模式僅能同時存在一種模式，與真實土壤受剪之行為較為類似。

就後續研究而言，直剪模擬部分應該要繼續進行，並著重於接觸鍵結參數與凝聚力與摩擦角之關係探討，以期提供相對應之數值分析輸入參數使用。

表 4.3.1 平行鍵結模式模擬具凝聚力材料之微觀參數與力學參數關係表

輸入參數 (Pa/m) / kn,ks(N/m)	A $pb_k_n = 3.6\times10^6$ $pb_k_s = 1.2\times10^6$	B $pb_k_n = 7.2\times10^7$ $pb_k_s = 2.4\times10^7$	C $pb_k_n = 1.8\times10^8$ $pb_k_s = 6\times10^7$	D $pb_k_n = 3.6\times10^8$ $pb_k_s = 1.2\times10^8$
$k_n = 3.6\times10^6$ $k_s = 1.8\times10^6$ $\mu = 0.24$	c=6.39kPa ϕ=37.6°	c=15.34kPa ϕ=39.41°	c=37.8kPa ϕ=38.85°	c=44.24kPa ϕ=44.23°

表 4.3.2 接觸鍵結模式模擬具凝聚力材料之微觀參數與力學參數關係表(滑動模式下之微觀參數與表 4.3.1 所列相同)

輸入參數 (N) / 粒徑尺寸	A n_bond=0 s_bond=0	B n_bond=0.1 s_bond=0.1	C n_bond=1 s_bond=1	D n_bond=5 s_bond=5
0.5(mm)	c=9.57kPa ϕ=15.37°	c=8.1kPa ϕ=18.00°	c=13.41kPa ϕ=13.34°	c=46.16kPa ϕ=16.55°

- 逆斷層

數值模擬之結果與砂箱實驗之結果比對，破裂跡之趨勢一致，都向下盤彎斜。但數值模擬之剪切帶較寬，並且偏向下盤，此差界之主要原因是數值模擬顆粒粒徑為砂箱所使用的石英砂之尺寸大 20 倍所造成。也就是顆粒愈大，剪切帶的範圍也愈寬。

利用校正過的微觀參數，進行不同正斷層或逆斷層傾角的 PFC 數值模擬，可以建立在不同正斷層或逆斷層垂直錯動量下的地表變形剖面。本文提出 Eq.3.3.4、Eq.3.3.5、Eq.3.3.6 及 Eq.3.3.7、Eq.3.3.8 及 Eq.3.3.9 來進行初步評估及預測。

- 生長斷層

剪切帶內的土層因受到多次錯動的作用而傾斜甚至變得很陡，此一現象與 SCF-2 鑽井內所看到的現象相同，由此數值模擬及鑽井資料比較的結果可以確定一件事。比較人工判識及自動判識之結果，可以看到生長斷層中的剪切帶會沿著既有的剪切帶發展，並且剪切帶會傾向下盤，使得其角度比斷層在基盤中的角度還小。而第 169 層生長層沉積完後(如同今日之台北盆地)，若基盤再錯動 2.5m，則造成地表出現之剪切帶範圍(橢圓率門檻值 1.5，γ = 41%)約為 14m。

參考文獻

2007 Working Group on California Earthquake Probabilities, (2008), The Uniform California Earthquake Rupture Forecast, Version 2, U.S. Geological Survey Open-File Report 2007-1437.

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

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 Oettle, N. K. (2012), Lecture note "BUILDING NEAR FAULTS", 2012 WILLIAM B. JOYNER MEMORIAL LECTURE, Seismological society of America & earthquake engineering research institute, Berkeley, California, United States.

Bray, J. D., Seed, R. B. and Seed, H. B. (1994), Analysis of earthquake fault rupture propagation through cohesive soil, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120, No. 3, 562-580

Chang, Y. Y., Lee, C. J., Huang, W. C., and Hung, W. Y. (2013), "A study on the characteristics of the ground surface deformation induced by the reverse fault slip," Proceedings 10th International Conference on Urban Earthquake Engineering, March 1-2, 2013, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, pp.409-413.

Chang, Y. Y., Lee, C. J., Hung, W. Y., Chen, T., Tsai, C. H., and Huang, W. C. (2012)," Centrifuge modeling of normal faulting and reverse faulting," 2012 Taiwan-Japan Symposium on the Advancement of Urban Earthquake Hazard Mitigation Technology, Jhongli, Taiwan. September 17-18, pp.72-78.

Chang, Y. Y., Lee,C. J., Huang W. C., Huang, W. J., Lin, M. L., Hung, W. Y. and Lin, Y. H. (2013), "Use of centrifuge experiments and discrete element analysis to model the reverse fault slip," International Journal of Civil Engineering, Transaction B: Geotechnical Engineering, (accepted)

Cheng, C. T., Chiou, S. J., Lee, C. T. and Tsai, Y. B. (2007), Study on probabilistic seismic hazard maps of Taiwan after Chi-Chi earthquake, Journal of GeoEngineering Vol.2, No.1, 19-28

Cheng, S. C., Yen, I. C. and Yu, M. D. (1996), The 1951 Taitung Earthquake in Taiwan, J. Geol. Soc. China. 39, 3, 267-285.

Christie-Blick, N. and Biddle K. T. (1985), Deformation and basin formation along strike-slip faults, Strike-Slip Deformation, Basin Formation, and Sedimentation 1-34, Soc. of Econ. Paleontol. and Mineral., Tulsa, Okla.

Dooley, T. P. and Schreurs, G. (2012), Analogue modelling of intraplate strike-slip tectonics: A review and new experimental results. Tectonophysics 574-575, 1-71.

Gazetas, G., Pecker, A., Faccioli, F. and Paolucci, R. (2008), Preliminary design recommendations for dip-slip fault-foundation interaction. Bulletin of earthquake engineering 6(4), 677-687.

Graymer, R. W., Ponce, D. A., Jachens, R. C., Simpson, R.W., Phelps, G. A. and Wentworth, C. M. (2005), Three-dimensional geologic map of the Hayward Fault, northern California: Correlation of rock units with variations in seismicity, creep rate, and fault dip. Geology, 33, 6, 521-524.

Graymer, R.W., Jones, D. L., and Brab, E. E. (1995), Geologic map of the HaywardFault zone, Contra Costa, Alameda, and Santa Clara Counties, California: Adigital database: U.S. Geological Survey Open-File Report 95-597.

Guerroué, E. Le. and Cobbold P. R. (2006), Influence of erosion and sedimentation on

strike-slip fault systems:insights from analogue models. Journal of Structural Geology 28, 421-430

Harding, T. P. (1985), Seismic characteristics and identification of negative flower structures, positive flower structures, and positive structural inversion. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 69, 582-600.

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

Jui-Pin Wang, Duruo Huang, and Su-Chin Chang, Assessment of seismic hazard associated with the Meishan fault in Central Taiwan, Bull. Eng. Geol. Environ, 2013(72), 249–256

Labonte, J. L. and Wong, S. (2013), Design of Water Transmission Pipelines Crossing the Hayward Fault，SFPUC，

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.

Lienkaemper, J. J., Galehouse, J. S. and Simpson, R. W. (2001), Long-termmonitoring of creep rate along the Hayward Fault and evidence for alasting creep response to 1989 Loma Prieta earthquake, Geophys. Res.Lett. 28, 2265–2268.

Lienkaemper, J. J., McFarLand, F. S., Simpson, R. W., Bilham, R. G., Ponce, D. A., Boatwright, J. J. and Caskey, S. J. (2012), Long-term Creep Rates on the Hayward Fault: Evidence for Controls on the Size and Frequency of Large Earthquakes, Bulletin of the Seismological Society of America102, 31-41.

Lienkaemper, J. J., Williams, P. L. and Guilderson, T. P. (2010), Evidence fora twelfth large earthquake on the southern Hayward Fault in the past1900 years, Bull. Seismol. Soc. Am. 100, doi 10.1785/0120090129.

Lin, C. Z. (2005), Shanchiao Fault and Geological Structure of West Edge of Taipei Basin. Symposium on Volcanic Activities and the Shanchiao Fault in the Taipei Metropolis2005. p. 191-9.

Lindvall, S.C., Rockwell, T.K. and Hudnut, K.W. (1989), Evidence fore prehistoric earthquakes on the Supperstition Hills fault from offset geomorphic features: Bulletin of the Seismological Society of America, 79, 342-361.

Morgan, J.K. (2004), Particle dynamics simulations of rate and state dependent frictional sliding of granular fault gouge, Pure Appl. Geophys., 161,1877-1891.

Naylor, M.A., Mandl, G., Sijpesteijn, C. H. K. (1986), Fault geometries in basement-induced wrench faulting under different initial stress states. Journal of Structural Geology 8, 737-752.

Oettle, N. K. and Bray, J. D. (2013), Geotechnical mitigation strategies for earthquake surface fault rupture, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 139, No. 11, 1864–1874

PFC2D version 3.0 online user manual。

Place, D. G. and Mora, P. R. (2000) Numerical simulation of localization phenomena in a fault zone. Pure and Applied Geophysics Special Issue: Mircoscopic and Macrospcopic Simulation: Towards Predictive Modeling of the Earthquake Process., 157 11/12:1821-1845.

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.

Sylvester, A. G. (1988), Strike-slip faults,Geological Society of America Bulletin, 1988;100, no. 11;1666-1703.

Wells, D. W. and Coppersmith, K. J. (1994), New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bulletin of the

Seismological Society of America 84, 974-1002.
WLA, (2008) Technical Memo Summarizing Fault Movement Parameters for BDPL No. 3. May.
Yamaguchi, M. and Ota, Y. (2004), Tectonics interpretations of Holocene marine terraces, east coast of Coastal Range, Taiwan. Quanternary International, 115-116, 71-81.
Yimsiri, S., Sogs, K. (2000), Micromechanics-based stress-strain behavior of soils at small strains, Geotechnique 50, No.5 pp.591-571.
Yu, S. B., Jackson, D. D., Yu, G. K. and Liu, C. C. (1990), Dislocation Model for crustal deformation in the Longitudinal Valley area, eastern Taiwan. Tectonophysics, 183, 97-109.
朱傚祖、游明聖 （1995），花東縱谷活動斷層調查研究。行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告，共 186 頁。
李崇正、張有毅、黃文昭、黃文正、洪汶宜、陳婷、蔡晨輝 (2012)，「正斷層及逆斷層錯動之離心模擬」， 中華民國力學學會第三十六屆全國學會議，11 月 16 日至 17 日，中壢市，國立中央大學。
李錫堤、鄭錦桐、紀立民、廖啟雯、廖卿妃（2000），槽溝開挖探查成果簡介。第三屆台灣活斷層調查研討會資料。
周坤賢 (1998)，模型樁貫入砂土之行為及分析，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文，台北。
林明聖、蕭謙麗 (1998)，米崙礫岩台地上的橫移斷層系統，東台灣研究，No. 3，第 13-29 頁。
林啟文、陳文山、劉彥求、陳柏村 (2009)，台灣東部與南部的活動斷層，經濟部中央地質調查所特刊，23 號。
林啟文、盧詩丁、石同生、林偉雄、劉彥求、陳柏村 (2008)，台灣中部的活動斷層，經濟部中央地質調查所特刊，21 號。
林啟文、盧詩丁、石同生、劉彥求、林偉雄、林燕慧 (2007)，台灣西南部的活動斷層，經濟部中央地質調查所特刊，17 號。
林朝宗 (2001)，台北都會區地質災害研討會論文集。
林慶偉 (1994)，斜滑斷層系統之構造形態研究，行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告，共 65 頁。
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，10 月 25-26 日，苗栗，pp.739-748。
徐鐵良 (1955)，台灣之地形，臺灣銀行季刊，第 7 卷，第 2 期，第 8-25 頁。
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，9 月 5 日至 7 日，No. 11009，第 1-10 頁。
張麗旭、周敏、陳培源 (1947)，民國三十五年十二月五日之台南地震。台灣省地質調查所彙刊，第 1 號，11-23 頁。
粘為東 (2010)，以 PFC2D 模擬砂土直剪實驗中之剪動帶及應用之研究，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文，台北。
陳文山 (2012)，重要活動斷層構造特性調查，經濟部中央第質調查所期末報告。
陳文山、李錫堤、石瑞銓、楊小青、楊志成、顏一勤、劉力豪、張徽正、侯進雄 (2004b)，新化斷層的構造特性與古地震研究。經濟部中央地質調查所特刊，第 15 期，111-119 頁。
陳文山、楊志成、楊小青、吳樂群、林啟文、張徽正、石瑞銓、林偉雄、李元希、石同生、盧詩丁 (2004a)，從構造地形探討嘉南地區的活動構造。經濟部中央地質調查

所彙刊。經濟部中央地質調查所彙刊，第 17 期，53-77 頁。
楊蔭清 (1953)，四十一年來之花蓮地震。台灣文獻，創刊號，第 67-71 頁。
詹佩臻、林銘郎、李崇正、黃文昭、黃文正、盧詩丁、林燕慧 (2012)，斷層近地表變形與工程特性探討，大台北地區防災地質研討會 2012，新北市中和市，9 月 13 日。
廖宏祥 (2006)，米崙斷層淺層震測研究，國立中正大學地震研究所碩士論文，共 82 頁。
臺北自來水事業處 (2013)，第 8 屆台、美、日自來水設施耐震對策研討會暨考察舊金山自來水耐震及高地區加壓設施參訪報告。
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，經濟部中央地質調查所專題報告。
鍾春富 （2007），逆斷層錯動引致上覆土層變形行為及對結構物影響之研究，台灣大學土木工程研究所博士論文。

審查意見	審查意見答覆與處理情形
1. 請增加世界破壞性歷史地震的變形資料。	以往之歷史地震記錄及文獻著重在記錄地震規模及斷層線長度，相較而言，文獻對斷層影響範圍的記錄是比較不足的。直到 1999 年的集集地震之後，學術界才開始重視斷層沿線的影響範圍。2009 年 Paleoseismology(第二版)中已有少數案例，研究團隊將於第四年計畫中繼續進行文獻搜尋。
2. 請評估主斷層傾角變化對地表變形之影響。	本研究在第二年度期中報告時也討論過此問題，由於本研究為模擬正斷層錯動時覆土層錯動之情形，必需為模擬對象定義一個基盤部份和覆土部份的交界處，而本研究在模擬山腳斷層時，本研究將第三紀沉積物的頂部定義為此交界處，視第三紀基盤頂端為水平，位於第三紀沉積物以下的構造在模擬中皆視為基盤的一部份，其斷層線為單一的傾角(60°)，以便簡化問題，因此以現階段的研究方針還不會納入正斷層底部還有逆斷層或斷層傾角變緩的變因。
3. 請說明花崗國中建築工地開挖時是否發現斷層錯動跡象。	經過現地調查，並無發現變形。
4. 米崙山之形成與米崙斷層具有相關性，建議探討米崙山之成因，可了解活動斷層近地表之變形特性。	林明聖等(1998)指出，在主應力為西北-東南向的區域構造應力作用下，米崙台地兩側發育了北北東向，含有左移分量的邊界斷層，由於台地東側斷層的左移分量遠大於台地西側斷層，因而造成兩斷層中間所夾的楔形塊體向斷層收斂側推擠，形成古米崙台地。當古米崙台地形成不久後，新的斷層於背斜軸部生成，再將台地切割成東、西兩楔形地塊。如此場景，隨著生斷層的發育，再度發生，才會使得使的米崙台地上又再推擠出美崙山(與花崗山)。
5. 山腳斷層數值模擬設定斷層傾角為60°，但一般正斷層傾角皆較陡(可達 80°)，請加強說明。	由於山腳斷層之斷層跡被覆蓋在在厚厚的台北盆之下，至今仍難以看到真實的山腳斷層跡，雖然已有鑽井鑽到基盤，但也尚未鑽到基盤中的斷層跡。因此，不論在基盤內或是上覆土層中，山腳斷層之傾角對每一位學者而言仍是一個未知。本團隊選用60°作為斷層傾角有兩個原因，一是必需符合山腳斷層五股剖面之 SCF-2 及 WK-1 之鑽孔距離及基盤深度的高差所做的估計；第二個原因是根據斷層力學關點，60°是最容易產生正斷層的角度。因此，在無法取得山腳斷層真實傾角之前，本研究建議模擬角度使用60°。
6. 橫移斷層砂箱試驗成果強調垂直剖面之觀察，請考慮增加水平剖面之觀察。	感謝委員之意見，橫移斷層之砂箱實驗較不易進行水平剖面之觀察，因此委員之意見應該會應用在數值模擬中。
7. 在描述斷層剖面花狀構造時，請考慮砂土之剪脹性。	感謝委員之意見，本團隊已將橫移斷層中之花狀構造用一個可以用數學式描述的弧面來比對，如圖 3.2.61 所示為初步(2D)的比對結果。本團隊將於明年之計畫報告中提供 3D 之比對結果。
8. 建議在數據展現中使用相對物理量之比值，例如：基礎承載值與極限承載值比。	感謝委員之意見，明年之研究成果劃總成果將注意數據展示的方式。

9. 建議將地表變動扣除安全值以逆推危險的土層厚度(或寬度)。	感謝委員之意見，由於明年度之重點即為考量各種剪切帶之影響因子及進行敏感度分析，因此研究團隊在進行土層厚度之敏感度分析時，會考量安全係數及地表建築物的影響。
10. 實驗與模擬會有一定的限制，與現場實際斷層破裂情形會有差距，請加以說明實驗與模擬之限制及現場可能之差異狀況，並儘可能以實際案例加以討論。	誠如委員之意見，實驗與模擬本是研究方法的其中一環，與實際斷層破裂情形不同，但卻是一個簡化問題並用於學理研究很好的方式，本研究團隊秉持著現地碰到的問題才是關鍵問題的精神，不管是逆斷層、正斷層或是橫移斷層皆進行過數次的現地調查。另外，為改進過去砂箱實驗僅能模擬小尺度之砂箱，本研究的砂箱實驗一直以離心機為研究核心(除了橫移斷層砂箱無法放在離心機上之外)，其不同 g 值所模擬的現地尺度可參考表 2.3.1。另外，在數值模擬上，模擬現地尺度會碰到的問題是顆粒粒徑比需放大，以符合電腦之運算速度，其放大比例可參考圖 2.4.1，未來本研究團隊也會針對顆粒粒徑放大對實驗結果之影響進行探討。
11. 報告書第四章「結論與建議」，請在建議部分再予加強。	感謝委員之意見，已於期末報告定稿中之第四章做修正。
12. 明年為第 4 年期計畫之最後一年，請團隊針對各類形斷層及上覆土層性質提供斷層活動之影響範圍寬度之更具體資料或公式。	感謝委員之意見，本團隊已於 102 年 12 月 19 日開會研擬 103 年度之研究計畫，預計將於 103 年 1 月之期初簡報提出會影響剪切帶寬度的參數，包含各類形斷層及上覆土層性質，並進行各類形斷層之數值模擬的敏感度分析。