經濟部

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(100~103 年)

成果總報告

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 103 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(100~103 年)

成果總報告

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 103 年 12 月

目錄

目錄 I

圖目錄 III

表目錄 XIV

摘要 XVI

第一章、前言 1

1.1 計畫背景 1
1.2 研究目的 2
1.3 研究方法 2
1.4 分年研究項目 2

第二章、國內外文獻回顧及現地調查 5

2.1 地震斷層引致地表變形彙整 5
2.1.1 逆移斷層地震事件 6
2.1.2 正移斷層地震事件 7
2.1.3 橫移斷層地震事件 8
2.2 國內外斷層帶退縮距離法規比較 20
2.2.1 美國加州 20
2.2.2 日本 20
2.2.3 中國 21
2.2.4 臺灣 21
2.3 斷層沿線力學性質分析成果 24
2.3.1 車籠埔斷層 24
2.3.2 山腳斷層 36
2.3.3 米崙斷層 46
2.4 竹山槽溝現地調查 51
2.4.1 2012 年的新開挖剖面 51
2.4.2 三維斷層形貌及構造演化 51
2.4.3 構造演繹另釋 52

第三章、砂箱實驗研究成果 63

3.1 斷層離心模型實驗介紹 63
3.2 逆斷層離心模型試驗的試驗成果 73
3.2.1 覆土層為砂土之試驗成果 73
3.2.2 覆土層為黏土之試驗成果 75
3.2.3 覆土層為黏土與砂土互層之試驗成果 75
3.3 正斷層離心模型試驗的試驗成果 96
3.3.1 覆土層為砂土之試驗成果 96
3.3.2 覆土層為黏土之試驗成果 98
3.3.3 覆土層為黏土與砂土互層之試驗成果 98

3.4 橫移斷層實驗及成果 118
第四章、數值模擬研究成果 129
4.1 微觀參數與物理實驗校核成果 129
4.1.1 離心模型自重壓密試驗 129
4.1.2 PFC2D 自重壓密數值試驗 130
4.1.3 直剪數值模擬中砂土之摩擦角 142
4.1.4 直剪數值模擬中外盒之尺寸效應 143
4.1.5 以直剪實數值模擬求取砂土試體之巨觀參數 145
4.2 由數值模擬推測剪切帶之方法 155
4.3 生長斷層的數值模擬及推測剪切帶之方法 155
第五章、地表變形之影響範圍 164
5.1 逆斷層地表變形剖面函數化的建立 164
5.2 逆斷層錯動後引致之地表變形之影響範圍 169
5.3 正斷層錯動後引致之地表變形之影響範圍 190
5.4 橫移斷層錯動後引致之地表變形之影響範圍 193
第六章、斷層與結構物互制討論 195
6.1 斷層與結構物互制文獻回顧 195
6.1.1 淺基礎 195
6.1.2 樁基礎 203
6.1.3 沉箱基礎 207
6.1.4 隧道 213
6.2 剛性淺基礎版與逆斷層的互制效應及對斷層跡發展的影響 229
6.3 剛性淺基礎版與正斷層的互制效應及對斷層跡發展的影響 242
6.4 機率式斷層位移危害度分析(PFDHA) 249
第七章、結論 260
7.1 現地調查與文獻整理 260
7.2 砂箱實驗 260
7.3 數值模擬 261
7.4 斷層與基礎互制關係 263
參考文獻 266
附錄 歷年委員意見答覆表 271
計畫主要績效指標 295

圖目錄

圖 1.1.1 台灣活動斷層分布圖 4

圖 1.1.2 三種研究方法間之整合關係 4

圖 2.1.1 1999 年 9 月 21 日台灣中部的集集地震之地表破裂 9

圖 2.1.2 2005 年 10 月 8 日巴基斯坦的 KASHMIR 地震之地表破裂。 10

圖 2.1.3 2008 年 5 月 12 日中國的汶川地震之地表破裂 11

圖 2.1.4 2009 年 4 月 6 日義大利中部的 L'AQUILA 地震之地表破裂 12

圖 2.1.5 2011 年 4 月 11 日日本的 HAMADORI 地震之地表破裂 13

圖 2.1.6 1997 年 7 月 9 日南美委內瑞拉的 CARIACO 地震之地表破裂 14

圖 2.1.7 1999 年 10 月 16 日美國加州的 HECTOR MINE 地震之地表破裂 15

圖 2.1.8 2000 年 7 月 17 日及 21 日冰島南部的雨起地震之地表破裂 16

圖 2.1.9 2001 年 11 月 14 日中國的 KUNLUNSHAN 地震之地表破裂 17

圖 2.1.10 2007 年 3 月 6 日印尼蘇門答臘島的雨起地震(M>6)之地表破裂 18

圖 2.1.11 2010 年 9 月 4 日紐西蘭南島的 GREENDALE 地震之地表破裂 19

圖 2.3.1 車籠埔斷層竹山博物館預定地附近鑽井及工程鑽孔位置圖 28

圖 2.3.2 竹山博物館工程鑽孔 A2 及 A3 進行無圍壓縮試驗應力應變曲線 29

圖 2.3.3 三軸壓密不排水壓縮試驗應力應變曲線 29

圖 2.3.4 以標準貫入試驗 N 值推估彈性模數(OHYA ET AL., 1982) 30

圖 2.3.5 本計畫進行之車籠埔斷層主線(南孔)及分枝(北孔)鑽孔相對位置圖 34

圖 2.3.6 中正公園鑽孔(北孔)土壤(由保麗龍取代)及岩心照片(0~12 公尺處) 34

圖 2.3.7 豐原中正公園南側鑽孔 35

圖 2.3.8 山腳斷層沿線仙渡超高壓變電所基地鑽探位置圖(直線段為山腳斷層線) 41

圖 2.3.9 山腳斷層於仙渡超高壓變電所附近土層物理性質及力學性質隨高程變化圖 42

圖 2.3.10 山腳斷層於仙渡超高壓變電所附近土層簡化土層第一層之物理性質及力學性質分佈圖 43

圖 2.3.11 山腳斷層於仙渡超高壓變電所附近土層簡化土層第一層推估力學參數分佈圖 44

圖 2.3.12 山腳斷層於仙渡超高壓變電所附近土層簡化土層第二層推估力學參數分佈圖 44

圖 2.3.13 山腳斷層於仙渡超高壓變電所附近土層簡化土層第二層之物理性質及力學性質分佈圖 45

圖 2.3.14 米崙斷層與臨近工程鑽孔分佈圖 49

圖 2.3.15 臨近米崙斷層工程鑽孔之標準貫入試驗值與高程關係圖 50

圖 2.3.16 臨近米崙斷層土層之彈性模數(左圖)、波松比(右圖)與高程關係圖 50

圖 2.3.17 臨近米崙斷層土層之楊氏模數(左)、摩擦角(右)與高程關係圖 50
圖 2.4.1 車籠埔斷層保存園區中重開挖的竹山槽溝及其保護結構。A.竹山槽溝於保護結構中的場景。B.保護竹山槽溝的人造結構外觀。 54
圖 2.4.2 竹山槽溝重新開挖後的樣貌。A.現地照片，B.現地測量後所繪製的水平投影圖 55
圖 2.4.3 竹山槽溝重新開挖後的南牆剖面 56
圖 2.4.4 竹山槽溝 2001 年開挖北牆主要變形處的剖面 57
圖 2.4.5 竹山槽溝重新開挖後的北牆剖面 58
圖 2.4.6 竹山槽溝 2001 年開挖南牆主要變形處的剖面 59
圖 2.4.7 竹山槽溝東牆正面照 60
圖 2.4.8 竹山槽溝中斷層形貌三維的示意圖 61
圖 2.4.9 竹山槽溝構造之演繹圖 62
圖 3.1.1 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 69
圖 3.1.2 中大地工離心機全景 69
圖 3.1.3 (A)斷層錯動模擬試驗箱；(B)地表剖面掃瞄台車 69
圖 3.1.4 離心機斷層錯動試驗之座標及試驗配置圖 70
圖 3.1.5 掃瞄台車在正逆斷層錯動試驗過程中所量測之地表剖面 71
圖 3.1.6 人工黏土試體床(G/C=34%)之準備過程 72
圖 3.1.7 人工黏土的夯實曲線及十字片剪力強度關係 72
圖 3.2.1 逆斷層錯動試驗(80GRTEST23)，在不同垂直錯動量下的地表變位剖面 77
圖 3.2.2 逆斷層錯動試驗，在不同垂直錯動量的地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係(80GRTEST23) 78
圖 3.2.3 逆斷層錯動試驗(80GRTEST23)，在不同垂直錯動量的正規化地表變位剖面 78
圖 3.2.4 逆斷層錯動試驗(40GRTEST21)，在不同垂直錯動量的地表變位剖面 79
圖 3.2.5 逆斷層錯動試驗(40GRTEST21)，在不同垂直錯動量的地表變位剖面 79
圖 3.2.6 逆斷層錯動試驗(1GRTEST20)，在不同垂直錯動量的地表變位剖面 80
圖 3.2.7 逆斷層錯動試驗(1GRTEST20)，在不同垂直錯動量的地表變位剖面 80
圖 3.2.8 逆斷層錯動試驗，在不同試驗 G 值下，不同垂直錯動量的地表變位剖面比較 81
圖 3.2.9 逆斷層錯動試驗在 80G 下斷層跡發展的側視剖面 81
圖 3.2.10 逆斷層錯動試驗在 80G 下斷層跡發展的側視剖面 81
圖 3.2.11 逆斷層錯動試驗在 1G 下斷層跡發展的側視剖面 82
圖 3.2.12 逆斷層錯動試驗在 80G 下斷層跡發展範圍的數位側視剖面 82
圖 3.2.13 逆斷層錯動試驗斷層跡發展範圍的數位剖面：(A)80G；(B)40G；(C)1G 83

圖 3.2.14 80G 逆斷層試驗條件，不同覆土層厚度(16M 及 8M)，在垂直錯動量比（R=25%），斷層破裂面發展之比較 84

圖 3.2.15 80G 逆斷層試驗條件，不同相對密度砂土試體，垂直錯動量 4M(R = 25%），破裂面發展之比較 84

圖 3.2.16 不同剪力強度純黏土試體逆斷層錯動試驗結果之比較。 85

圖 3.2.17 不同剪力強度純黏土試體逆斷層錯動試驗，地表剖面結果之比較 85

圖 3.2.18 不同剪力強度純黏土試體及砂試體逆斷層錯動試驗，地表剖面結果比較 86

圖 3.2.19 黏土及砂土覆蓋黏土之互層試體(SU =100 KPA)，逆斷層錯動試驗，地表變形高程剖面 86

圖 3.2.20 黏土及砂土互層試體，逆斷層錯動試驗，砂及黏土界面之地下破裂跡發展之比較 87

圖 3.2.21 砂土覆蓋黏土之互層試體，逆斷層錯動試驗，砂及黏土界面之變形剖面照片 87

圖 3.2.22 黏土及砂土覆蓋黏土之互層試體，逆斷層錯動試驗，砂及黏土界面之變形高程剖面 88

圖 3.2.23 純砂土及砂土上覆黏土之互層試體，逆斷層錯動試驗，地表剖面及地下破裂跡之比較 88

圖 3.2.24 逆斷層錯動試驗(70GRTEST60-S/C (10/10)，S_U =100 KPA)，在不同垂直抬升量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度的關係 89

圖 3.2.25 逆斷層錯動試驗(70GRTEST77- C/S (10/10)，S_U =100 KPA))，在不同垂直抬升量下的地表變位剖面 89

圖 3.2.26 逆斷層錯動試驗(70GRTEST77- C/S (10/10)，S_U =100KPA)，在不同垂直抬升量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度的關係 90

圖 3.2.27 逆斷層錯動試驗(70GRTEST78- C/S (10/10)，S_U =50KPA))，在不同垂直抬升量下的地表變位剖面 90

圖 3.2.28 逆斷層錯動試驗(70GRTEST78-C/S (10/10)，S_U =50KPA)，在不同垂直抬升量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度的關係 91

圖 3.2.29 逆斷層錯動試驗(70GRTEST78-C3/S7 (06/14)，S_U =100KPA))，在不同垂直抬升量下的地表變位剖面 91

圖 3.2.30 逆斷層錯動試驗(70GRTEST78-C3/S7 (06/14)，S_U =100KPA)，在不同垂直抬升量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度的關係 92

圖 3.2.31 逆斷層錯動試驗，位於不同種類的互層地盤，受到 5CM 垂直錯動量，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度的關係 92

圖 3.2.32 不同土層逆斷層錯動試驗，垂直抬升量 5 CM，地下斷層跡剖面的比較 92

圖 3.2.33 不同互層土層逆斷層錯動試驗，垂直抬升量 5CM，地表破裂型態的比較 93

圖 3.2.34 不同黏土層厚度的互層土層逆斷層錯動試驗，垂直抬升量 5CM，地表破裂型態及地下斷層跡剖面的比較 93

圖 3.2.35 不同互層土層逆斷層錯動試驗，地下斷層跡剖面的比較 94

圖 3.2.36 不同互層土層逆斷層錯動試驗，地下斷層跡剖面的比較 95

圖 3.3.1 正斷層錯動試驗(80GNTEST24，DR=70%)，在不同垂直陷落量下的地表變位剖面 100
圖 3.3.2 正斷層錯動試驗(80GNTEST24)，在不同垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係 100
圖 3.3.3 正斷層錯動試驗(40GNTEST26，DR=70%)，在不同垂直陷落量下的地表變位剖面 101
圖 3.3.4 正斷層錯動試驗(40GNTEST26，DR=70%)，在不同垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係 101
圖 3.3.5 正斷層錯動試驗(40GNTEST30，DR=70%)，在不同垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係 102
圖 3.3.6 正斷層錯動試驗(40GNTEST30，DR=70%)，在不同垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係 102
圖 3.3.7 正斷層錯動試驗(1GNTEST31，DR=70%) ，在不同垂直陷落量下的地表變位剖面 103
圖 3.3.8 正斷層錯動試驗(1GNTEST31，DR=70%)，在不同垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係 103
圖 3.3.9 正斷層錯動試驗，在不同 G 值及垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係 104
圖 3.3.10 正斷層錯動試驗(80GNTEST24)，在不同垂直陷落量下，正規化地表變位剖面與正規化水平距離關係 104
圖 3.3.11 正斷層錯動試驗(40GNTEST26)，在不同垂直陷落量下，正規化地表變位剖面與正規化水平距離關係 105
圖 3.3.12 正斷層錯動試驗(40GNTEST30)，在不同垂直陷落量下，正規化地表變位剖面與正規化水平距離關係 105
圖 3.3.13 正斷層錯動試驗(1GNTEST31)，在不同垂直陷落量下，正規化地表變位剖面與正規化水平距離關係 105
圖 3.3.14 正斷層錯動時上覆土層體積的變化關係 106
圖 3.3.15 正斷層錯動陷落試驗在 80G 試驗條件下，垂直陷落距離(50MM; 25%)的斷層側剖面(80GNTEST24).....106
圖 3.3.16 正斷層錯動試驗在 40G 試驗條件下，垂直陷落距離(50MM; 25%)的斷層側剖面(40GNTEST26).....106
圖 3.3.17 正斷層錯動試驗在 1G 試驗條件下，垂直陷落距離(50MM; 25%)的斷層側剖面(1GNTEST18).....107
圖 3.3.18 正斷層錯動試驗(40GNTEST32-C) ，在不同垂直陷落量下的地表變位剖面 107
圖 3.3.19 正斷層錯動試驗(40GNTEST32-C)，在不同垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係 108
圖 3.3.20 正斷層錯動試驗(50GNTEST36-C) ，在不同垂直陷落量下的地表變位剖面 108
圖 3.3.21 正斷層錯動試驗(50GNTEST36-C)，在不同垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷

層角度關係 109
圖 3.3.22 正斷層試驗(40GNTEST32-C)，試驗前後(Δ**h**=5CM)，地表裂縫及側視圖 109
圖 3.3.23 正斷層試驗(50GNTEST36-C)，試驗前後(Δ**h** =5CM)，地表裂縫及側視圖 109
圖 3.3.24 不同剪力強度純黏土試體正斷層錯動試驗，地表剖面結果之比較 110
圖 3.3.25 不同剪力強度純黏土試體正斷層錯動試驗結果之比較。 111
圖 3.3.26 不同剪力強度純黏土試體正斷層錯動試驗，地表剖面結果之比較。 111
圖 3.3.27 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 112
圖 3.3.28 正斷層錯動試驗(70GNTEST80-C/S (10/10 ，S_U =100KPA)，在不同陷落量下的地表變位剖面 112
圖 3.3.29 正斷層錯動試驗(70GNTEST80-C/S (10/10)，S_U =100KPA)，在不同陷落量下的地表變位剖面與正斷層角度關係 113
圖 3.3.30 正斷層錯動試驗(70GNTEST81-C3/S7 (06/14)，S_U =100KPA)，在不同陷落量下的地表變位剖面 113
圖 3.3.31 正斷層錯動試驗(70GNTEST80-C3/S7 (06/14)，S_U =100KPA)，在不同陷落量下的地表變位剖面與正斷層角度關係 114
圖 3.3.32 正斷層錯動試驗(70GNTEST82-C/S (10/10)，S_U = 50KPA)，在不同陷落量下的地表變位剖面 114
圖 3.3.33 正斷層錯動試驗(70GNTEST82-C/S (10/10) ，SU = 50 KPA)，在不同陷落量下的地表變位剖面與斷層角度關係 115
圖 3.3.34 正斷層錯動試驗，不同種類的互層地盤，在 5CM 的陷落量下，地表變位剖面之比較 115
圖 3.3.35 不同土層正斷層錯動試驗，垂直陷落量 5 CM，地下斷層跡剖面的比較。 116
圖 3.3.36 不同黏土層正斷層錯動試驗，垂直陷落量 5 CM，地表裂縫型態及寬度的比較。 116
圖 3.3.37 不同黏土層厚度進行正斷層錯動試驗，垂直陷落量 5 CM，地表裂縫型態及寬度的比較。 117
圖 3.3.38 正斷層錯動試驗，位於不同種類的互層地盤，受到 5 CM 垂直陷落量，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度的關係及比較 117
圖 3.4.1 砂箱試驗模型、座標及參數 123
圖 3.4.2 橫移斷層砂試驗模型。(A)側視圖(B)俯視圖 124
圖 3.4.3 (A)砂箱模型鋪沙狀況及(B)設置於雷射掃描儀 124
圖 3.4.4 雷射掃描測距系統 124
圖 3.4.5 橫移斷層試驗粒徑分布曲線 125
圖 3.4.6 橫移砂箱試驗之地表破裂跡歷程 125
圖 3.4.7 橫移砂箱試驗之地表破裂跡歷程-ST-1 125

圖 3.4.8 橫移砂箱試驗之地表破裂跡歷程-ST-2 126
圖 3.4.9 橫移砂箱試驗之地表破裂跡歷程 126
圖 3.4.10 橫移砂箱試驗之地表破裂跡歷程--S 127
圖 3.4.11 橫移砂箱試驗之地表破裂跡歷程—ST-2 127
圖 3.4.12 橫移砂箱試驗之地表破裂跡歷程 128
圖 4.1.1 離心模型試驗飛行階段的地表沈陷與有效覆土應力的關係（DR=70%） 129
圖 4.1.2 微觀模式組成率與巨觀模式組成率間的關係 136
圖 4.1.3 $\mathbf{Kn}\mathbf{Ks}=\mathbf{3}$，不同的$\mathbf{Kn}$值，與楊氏係數($E_V$及$E_H$)及剪力模數($G_{VH}$ 及 G_{HH})與異向性程度的關係 136
圖 4.1.4 $\mathbf{Kn}\mathbf{Ks}=\mathbf{3}$，不同的$\mathbf{Kn}$值，與柏松比($\boldsymbol{vhh}$，$\boldsymbol{vvh}$及$\boldsymbol{vhv}$)與異向性程度的關係 137
圖 4.1.5 $\mathbf{Kn}=\mathbf{8000000}\boldsymbol{N/m}$，不同的$\mathbf{Kn}\mathbf{Ks}$值，與楊氏係數($E_V$及$E_H$)與異向性程度的關係 137
圖 4.1.6 $\mathbf{Kn}=\mathbf{8000000}\boldsymbol{N/m}$，不同的$\mathbf{Kn}\mathbf{Ks}$值，與柏松比($\boldsymbol{vhh}$，$\boldsymbol{vvh}$及$\boldsymbol{vhv}$)與異向性程度的關係 138
圖 4.1.7 $\mathbf{Kn}=\mathbf{8000000}\boldsymbol{N/m}$，不同的$\mathbf{Kn}\mathbf{Ks}$值，與剪力模數($G_{VH}$ ，G_{VH}及G_{HH})與異向性程度的關係 138
圖 4.1.8 數值模擬所使用顆粒的篩分析曲線與試驗石英矽砂的篩分析曲線之比較 138
圖 4.1.9(A) 建構完成後的數值試驗模型 139
圖 4.1.9(B) 建構完成後的數值試驗模型及分層示意圖 139
圖 4.1.9(C)建構完成後的正斷層數值試驗模型及分層示意圖 139
圖 4.1.10 離心模型試驗的地表沈陷與 PFC^{2D} 數值試驗地表沈陷的比較 140
圖 4.1.11 不同錯動量下，離心機試驗的地表沈陷與 PFC2D 模擬地表變形剖面之比較 141
圖 4.1.12 PFC 直剪試驗模擬模型與斷層錯動實驗之數值模型關係 143
圖 4.1.13 顆粒輸入摩擦角與直剪輸出摩擦角關係圖 143
圖 4.1.14 不同盒長對應力比與剪動位移關係圖 145
圖 4.1.15 不同盒長對試體內接觸力分布的影響 145
圖 4.1.16 不同盒長對直剪盒內剪應變分布的影響 145
圖 4.1.17 PFC 直剪試驗數值模擬 150
圖 4.1.18 PFC 直剪試驗數值模擬取得之巨觀參數 151
圖 4.1.19 剪力盒分析單元網格示意圖 152
圖 4.1.20 PFC 直剪試驗數值模擬 Q/P 比值之落點圖 152
圖 4.1.21 PFC 直剪試驗數值模擬網格元素應力路徑 153
圖 4.1.22 主應力面旋轉圖 153

圖 4.1.23 各網格元素主應力比值 153
圖 4.1.24 顆粒摩擦係數及固定旋轉比例對巨觀砂土摩擦角之影響 154
圖 4.1.25 不同巨觀砂土摩擦角對剪切帶的影響 154
圖 4.2.1 數值模擬逆斷層錯動地下破裂跡之決定 157
圖 4.3.1 生長斷層數值模擬中以人工判識圈繪剪切帶 157
圖 4.3.2 在生長斷層數值模擬中設置監測點 158
圖 4.3.3 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，$\boldsymbol{\gamma = 41\%}$) 158
圖 4.3.4 169 層生長斷層數值模擬 159
圖 4.3.5 169 層生長斷層數值模擬結果 160
圖 4.3.6 169 層生長層錯動時所形成的剪切帶(橢圓率門檻值 1.5) 160
圖 4.3.7 169 層生長層錯動時所形成的剪切帶(橢圓率門檻值 1.1) 161
圖 4.3.8 169 層生長層錯動時所形成的剪切帶(橢圓率門檻值 1.05) 161
圖 4.3.9 169 層生長層錯動時所形成的剪切帶(橢圓率門檻值 1.01) 162
圖 4.3.10 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) 162
圖 4.3.11 169 層生長斷層及正斷層數值模擬顆粒接觸力(CONTACT FORCE)分佈情形 163
圖 5.1.1 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)。 167
圖 5.1.2 利用 GOMPERTZ 函數來描述地表變形剖面及斜率之示意圖 168
圖 5.1.3 逆斷層離心物理模型試驗地表變形剖面與 GOMPERTZ 之回歸比較圖 168
圖 5.1.4 逆斷層錯動後地表影響範圍之示意圖 169
圖 5.2.1 離心機模型試驗與 PFC2D 模擬地表變形比較圖 178
圖 5.2.2 GOMPERTZ 曲線方程式與離心機模型試驗及 PFC2D 模擬地表變形正規化比較圖 178
圖 5.2.3 以 GOMPERTZ 方程式表示地表變形及地表斜率示意圖 179
圖 5.2.4 土層產生逆向斷層變形之正規化示意圖 179
圖 5.2.5 直剪摩擦角為 30°下 X_{1M}、X_1 及 X_2 影響範圍包絡線 180
圖 5.2.6 直剪摩擦角為 33°下 X_{1M}、X_1 及 X_2 影響範圍包絡線 180
圖 5.2.7 直剪摩擦角為 36°下 X_{1M}、X_1 及 X_2 影響範圍包絡線 181
圖 5.2.8 直剪摩擦角為 40°下 X_{1M}、X_1 及 X_2 影響範圍包絡線 181
圖 5.2.9 黏土砂覆層(其中 C=35KPA，砂摩擦角為 33 度)下 X_{1M}、X_1 及 X_2 影響範圍包絡線 182
圖 5.2.10 摩擦角為 30°、33°、36°、40°黏土砂互層(其中 C=35KPA，砂摩擦角為 33 度)下 X_{1M}、X_1 及 X_2 之影響範圍比較 182
圖 5.2.11 摩擦角為 30°、33°、36°、40°黏土砂互層，斷層傾角 DIP=22.5°下 X_{1M}、X_1 及 X_2 之影響範圍比較 183

圖 5.2.12 摩擦角為 30°、33°、36°、40°黏土砂互層，斷層傾角 DIP=30°下 X_{1M}、X_1 及 X_2 之影響範圍比較 183

圖 5.2.13 摩擦角為 30°、33°、36°、40°黏土砂互層，斷層傾角 DIP=37.5°下 X_1 及 X_2 之影響範圍比較 184

圖 5.2.14 摩擦角為 30°、33°、36°、40°黏土砂互層，斷層傾角 DIP=45°下 X_1 及 X_2 之影響範圍比較 184

圖 5.2.15 摩擦角為 30°、33°、36°、40°黏土砂互層，斷層傾角 DIP=52.5°下 X_1 及 X_2 之影響範圍比較 185

圖 5.2.16 摩擦角為 30°、33°、36°、40°黏土砂互層，斷層傾角 DIP=60°下 X_1 及 X_2 之影響範圍比較 185

圖 5.2.17 摩擦角為 30°、33°、36°、40°黏土砂互層，斷層傾角 DIP=67.5°下 X_1 及 X_2 之影響範圍比較 186

圖 5.2.18 摩擦角為 30°、33°、36°、40°黏土砂互層，斷層傾角 DIP=75°下 X X_1 及 X_2 之影響範圍比較 186

圖 5.2.19 摩擦角為 30°、33°、36°、40°黏土砂互層，斷層傾角 DIP=82.5°下 X_1 及 X_2 之影響範圍比較 187

圖 5.2.20 摩擦角為 30°、33°、36°、40°黏土砂互層，斷層傾角 DIP=90°下 X_1 及 X_2 之影響範圍比較 187

圖 5.2.21 摩擦角為 30°、33°、36°、40°黏土砂互層，斷層傾角 DIP=22.5°~90°下 X_1 及 X_2 之影響範圍比較 188

圖 5.2.22 摩擦角為 30°、33°、36°、40°黏土砂互層，斷層傾角 DIP=22.5°~90°下之最大影響範圍包絡線 188

圖 5.2.23 不同錯動比，逆斷層錯動地表變形的最大影響範圍 189

圖 5.3.1 正斷層求取地表影響範圍之門檻示意圖 191

圖 5.3.2 正斷層求取地表影響範圍之門檻示意圖 191

圖 5.3.3 正斷層求取地表影響範圍之門檻示意圖 192

圖 5.4.1 橫移砂箱試驗之地表破裂跡發展影響範圍 194

圖 5.4.2 砂箱試驗第七階段地表破裂跡與影像疊合圖 194

圖 6.1.1 條形基礎與正斷層相對位置圖 195

圖 6.1.2 條形基礎所在位置與接觸力、彎矩發展之關係 197

圖 6.1.3 基礎所在位置與其旋轉角隨錯動量變化之關係 197

圖 6.1.4 基礎版所在位置與不同載重下造成剪應變帶發展情形 198

圖 6.1.6 淺基礎於逆斷層錯動下之接觸應力與彎矩分佈圖，基礎位置遠離自由場下之地表破裂點 200

圖 6.1.7 淺基礎於逆斷層錯動下在不同位置及錯動量下之旋轉角變化.....201
圖 6.1.8 土壤與座落於砂土層之淺基礎在逆斷層錯動下之互制機制.....202
圖 6.1.9 淺基礎位置與斷層錯動量造成土壤與基礎互制機制之關係.....202
圖 6.1.10 群樁與斷層錯動模擬示意圖.....203
圖 6.1.11 緊砂狀況下群樁與斷層錯動互制情形.....204
圖 6.1.12 緊砂狀況下群樁與斷層錯動互制情形.....204
圖 6.1.13 緊砂狀況下群樁與斷層錯動互制情形.....205
圖 6.1.14 斷層相交區域推估之隆起剪裂帶破壞示意圖.....207
圖 6.1.15 濁水山南端斷樁破壞示意圖.....207
圖 6.1.16 沉箱基礎與斷層錯動模型示意圖.....208
圖 6.1.17 沉箱基礎與斷層錯動互制關係，S/B=0.58，上排為離心機試驗結果，中排為 PIV 所得之塑性剪應變發展情形，下排為有限元素模型所得塑性剪應變分佈情形.....209
圖 6.1.18 沉箱基礎與斷層錯動互制關係，S/B=0.28，上排為離心機試驗結果，中排為 PIV 所得之塑性剪應變發展情形，下排為有限元素模型所得塑性剪應變分佈情形.....209
圖 6.1.19 沉箱基礎與斷層錯動互制關係，S/B=0.78，上排為離心機試驗結果，中排為 PIV 所得之塑性剪應變發展情形，下排為有限元素模型所得塑性剪應變分佈情形.....210
圖 6.1.20 逆斷層錯動對沉箱基礎影響參數示意圖.....211
圖 6.1.21 不同沉箱位置在逆斷層錯動下造成(A)沉箱垂直位移；(B) 沉箱水平位移；(C) 沉箱旋轉角度以及(D)土層剪裂帶發展之關係.....212
圖 6.1.22 車籠埔斷層對臨近高壓電塔之沉箱基礎產生位移之形態.....212
圖 6.1.23 隧道相對於逆斷層位置分佈圖.....213
圖 6.1.24 隧道相對於逆斷層位置分佈圖.....213
圖 6.1.25 逆斷層錯動與隧道互制機制.....216
圖 6.1.26 隧道所在位置覆土應力(KPA)與(A)隧道水平位移，(B) 隧道垂直位移以及(C)旋轉角之關係.....216
圖 6.1.27 明挖覆蓋隧道位於斷層破裂帶左側之地表與隧道變形反應.....218
圖 6.1.28 明挖覆蓋隧道位於斷層破裂帶中間之地表與隧道變形反應.....218
圖 6.1.29 明挖覆蓋隧道位於斷層破裂帶右側之地表與隧道變形反應.....219
圖 6.1.30 結構物容許變形區與剛性區之設計概念.....221
圖 6.1.31 使用地工格網進行道路加勁之工程處置方式.....222
圖 6.1.32 不同韌性之覆土層在不同垂直位移下之樓地版彎矩值分佈圖.....223
圖 6.1.33 筏式基礎厚度與樓地板彎矩及垂直變位關係圖。逆斷層(左圖)；正斷層(右圖).....223

圖 6.1.34 連續壁對樓地板彎矩值及垂直變位之影響關係圖 224
圖 6.1.35 以標準貫入試驗值推估黏性土壤彈性模數 226
圖 6.1.36 標準貫入試驗值與摩擦角關係圖 227
圖 6.1.37 標準貫入試驗值與正規化彈性模數關係圖 228
圖 6.2.37 A、B、C 及 D 剛性基礎版基本性質及照片 232
圖 6.2.38 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 232
圖 6.2.39 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 233
圖 6.2.40 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 234
圖 6.2.41 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，基礎版旋轉角及水平變位之比較 234
圖 6.2.42 921 集集地震逆斷層錯動建物損壞情形(黃文正提供) 235
圖 6.2.43 逆斷層試驗，B 基礎版在不同 S/B 的情況下，淺基礎版對逆斷層出露地表位置及主破裂面範圍之影響比較 236
圖 6.2.44 逆斷層試驗，B 基礎版在不同 S/B 的情況下，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 236
圖 6.2.45 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 237
圖 6.2.46 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 237
圖 6.2.47 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，基礎旋轉角及水平位移之比較 238
圖 6.2.48 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 的情況下，斷裂跡出露地表情形 239
圖 6.2.49 逆斷層錯動試驗，在相同 S/B=0.69 的情況下，不同載重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 239
圖 6.2.50 逆斷層試驗，相同 S/B=0 的情況下，不同載重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。 240
圖 6.2.51 逆斷層試驗，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。 240
圖 6.2.52 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。 241
圖 6.2.53 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地表面斷層跡出露景象的比較 241
圖 6.2.54 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 242

圖 6.3.39 本研究不同試驗，剛性淺基礎版與正斷層跡出露地表相對位置關係示意圖 244

圖 6.3.40 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 245

圖 6.3.41 正斷層錯動試驗不同垂直錯動量，B 基礎版在 S/B=0(70GNTESY70-F-B)及 S/B=1(70GNTEST71-F-B)的情況下，地表變形剖面之比較 245

圖 6.3.42 正斷層(80G)垂直錯動量 5CM 後自由場及 B 基礎版座落於 S/B=1 處，地下破裂跡的比較 246

圖 6.3.43 正斷層(70G)錯動 5CM，B 基礎版座落於不同位置，地下破裂跡的比較 246

圖 6.3.44 正斷層(70G)錯動 5CM 後，B 基礎版座落於 S/B=1 之地下破裂跡 247

圖 6.3.45 正斷層(70G)錯動 5CM 後，B 基礎位於 S/B=0 及 S/B=1，地下破裂跡比較 247

圖 6.3.46 正斷層(70G)不同垂直錯動量下，B 基礎版位於 S/B=0 及 S/B=1 處，旋轉角水平位移及垂直位移之比較。 248

圖 6.3.47 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 248

圖 6.3.48 B 型淺基礎座落位置對正斷層錯動地表變位剖面的影響 249

圖 6.1.38 地震規模與主斷層線平均位移之關係-WELLS 與 COPPERSMITH (1994)經驗公式與 PETERSEN ET AL. (2011)資料比較 257

圖 6.1.39 位移量(D)與主斷層位置之關係 257

圖 6.1.40 遠離平移斷層之主斷層線位移量分佈圖(PETERSEN 等人，2011) 258

圖 6.1.41 遠離正斷層主斷層線之地表破裂機率與距離關係(YOUNGS 等人，2003) 258

圖 6.1.42 正斷層上盤及下盤遠離主斷層線之正規化地表位移以及距離分布圖(YOUNGS 等人，2003) 258

圖 6.1.43 遠離平移斷層主線位移(左圖)及正規化位移(右圖)與距離之關係 (PETERSEN 等人，2011) 259

圖 6.1.44 不同網格邊長(左圖：25 公尺；右圖：200 公尺)對應之破裂機率與距離關係(PETERSEN 等人，2011) 259

表目錄

表 1.1.1 台灣活動斷層參數資料表 3
表 2.1.1 同震地表破裂相關的歷史地震 5
表 2.1.2 歷史地震同震地表破裂 6
表 2.2.1 美國、日本、中國大陸及台灣活動斷層帶管制比較表 22
表 2.3.1 車籠埔斷層位於竹山槽溝附近地層分佈 27
表 2.3.2 三軸壓密不排水壓縮試驗推估之割線模數 27
表 2.3.3 竹山槽溝附近鑽孔處簡化土層表 28
表 2.3.4 車籠埔斷層位於中正公園附近地層分佈 32
表 2.3.5 車籠埔斷層位於中正公園西南側地層分佈 32
表 2.3.6 豐原中正公園鑽孔處簡化土層表 33
表 2.3.7 豐原中正公園西南側鑽孔處簡化土層表 33
表 2.3.8 山腳斷層沿線仙渡超高壓變電所基地地層分佈表 40
表 2.3.9 山腳斷層於仙渡超高壓變電所附近地層簡化表 40
表 2.3.10 土壤一般物性及力學性質之分佈特性 41
表 2.3.11 臨近米崙斷層鑽孔基本資料表 48
表 2.3.12 米崙斷層南段之簡化土層建議表 49
表 2.3.13 米崙斷層北段之簡化土層建議表 49
表 3.1.1 離心模型與原型之相似性比較 66
表 3.1.2 四年期間完成的試驗編號及試驗條件(共 75 組) 67
表 3.4.1 試驗土樣之基本物理性質 122
表 3.4.2 模型試驗配置 122
表 3.4.3 驗證砂箱之試驗規劃 122
表 3.4.4 本研究砂箱之試驗規劃 123
表 4.1.1 PFC 直剪試驗模擬模型尺寸及顆粒大小與直剪盒尺寸關係 142
表 4.1.2 顆粒輸入摩擦角與直剪輸出摩擦角回歸參數 143
表 4.1.3 50KPA~150KPA 膨脹角表 147
表 4.1.4 網格元素 17 於垂直應力 50 KPA~150 KPA 下主應力面旋轉表 148
表 4.1.5 各網格元素 50KPA~150KPA 主應力及其比值 149
表 5.1.1 正逆斷層數值模擬參數矩陣 164

表 5.1.2　80GRTEST23 GOMPERTZ 函數之回歸參數表 166
表 5.1.3 角變量與建築物損壞程度(BJERRUM [A]) 166
表 5.2.1 斷層傾角等於 22.5°時未修正之 X_1 及 X_2 之回歸方程式 174
表 5.2.2 摩擦角為 30°、斷層傾角等於 22.5°時之回歸方程式參數 175
表 5.2.3 逆斷層錯動後於不同之 R 下，地表可能產生之最大影響範圍 176
表 5.2.4 摩擦角 30°、33°、36°、40°及黏土砂互層 X_{1M}、X_1 及 X_2 之回歸方程式 177
表 5.2.5 摩擦角為 30°、33°、36°、40°及黏土砂互層，斷層傾角 DIP=22.5°~90°
下 X_{1M}、X_1 及 X_2 之回歸方程式 177
表 5.4.1 部分國外砂箱試驗之比較 193
表 6.1.1 車籠埔斷層錯動造成椿基礎損壞及位移調查結果 206
表 6.1.2 隧道在不同試驗條件下之變形及位移特性 215
表 6.1.3 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) 220
表 6.1.4 標準貫入試驗值與相對密度、摩擦角對照表 227
表 6.1.5 砂層之正規化彈性模數對照表 228
表 6.1.6 不同土壤之波松比 229
表 6.1.7 斷層破裂機率與地震規模關係參數表 256
表 6.1.8 平均位移(AD)及最大位移(MD)與地震規模(M)關係 256
表 6.1.9 不同網格尺寸之參數對照表 257
表 6.1.10 遠離平移斷層主斷層線之破裂機率內插點資料 257

摘要

由於斷層活動時引發地表的破壞、變形行為及變形範圍與斷層類型、傾角及兩側岩層特性、厚度有密切的關係，透過分析本所既有成果（槽溝開挖、地質鑽探、地球物理探勘、地殼變形觀測等）與鄰近地區之工程地質鑽探資料，配合現地鑽探試驗所蒐集的地表岩層特性、力學性質等資料，可以推求各斷層近地表的變形特性、分析變形之主控因子與相關參數，及結構物因應減災之方式，以達成下列目的：

1. 探討斷層兩側覆土層變形行為(包含剪切帶發展、遷移及影響參數等)
2. 斷層錯移在近地表可能影響範圍。
3. 提出較合理的安全性探討指標，作為判斷建築物或設施安全性的參考。
4. 提供重要公共工程規劃與營運風險之參考。

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，三者之功用、目的與相互間之關係，如圖1所示。本計畫之研究為突破單一方法學提出結果之侷限性，因此併用現地調查、物理模型實驗(離心機逆、正斷層砂箱試驗；1g 斜移斷層砂箱實驗)及數值分析之方法，分別進行基本行為觀察及定量分析。

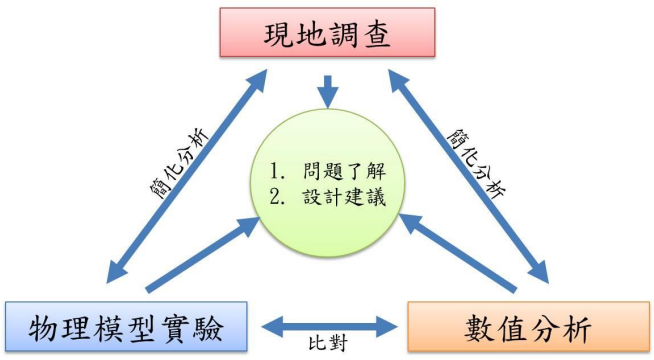


圖 1 三種研究方法間之整合關係

1. 現地調查與文獻回顧

(1) 斷層兩側覆土層之變形行為

1999 年的集集地震及同年的兩次規模七級以上的土耳其地震，讓世人對同震斷層引致地表變形的觀念，有顯著的改變。不再僅專注在地表斷層錯動量最大的斷層跡或顯著的斷層(撓曲)崖上，同時也開始記錄斷層地表跡兩側的次要破裂

及變形情形，也開始利用較精密的測量儀器，定量化地觀察，進而判釋地震斷層錯動的影響範圍。本研究收錄了 16 篇發表於 2001 年後，有關同震地表破裂的文章，相關的地震包括最早的 1997 年委內瑞拉芮氏規模 Ms6.8 的地震，到 2011 年日本 411 的 Hamadori 地震，共計有 11 個地震事件，以其相關的斷層滑移特性及其引致的破壞帶或變形帶寬，分成正移斷層地震事件 2 起、斜移斷層地震事件 6 起，逆移斷層地震事件 3 起，收錄於表 1 中。

表 1 歷史地震同震地表破裂

斷層錯動類型	相關地震	引致破壞帶或變形帶寬(公尺)	
		上盤	下盤
正滑斷層	6 April 2009 Mw 6.3 L'Aquila earthquake, Italy	170	
		140	30
	11 April 2011 Mw 6.6 Hamadori earthquake, Japan	5-50	
走向滑移斷層	9 July1997 Ms 6.8 earthquake, Venezuela	5-10	
	16 Oct. 1999 Hector Mine earthquake, Ca, USA	~50 (range: 10-500)	
	17 and 21 June 2000 Ms 6.6 earthquakes, Iceland	~25 (range: 2-50)	
	14 Nov. 2001 Mw7.8 Kunlunshan earthquake, China	5-50 (range: 1-1,890; max: 8,000)	
	6 March 2007 M >6 earthquake doublet, Indonesia	2-8	
	4 Sept. 2010 Mw7.1 Darfield earthquake, New Zealand	30-300	
逆滑斷層	21 Sept. 1999 Mw 7.6 Chichi earthquake, Taiwan	50-80 (range: 50-350)	
		42-322	8-28
	8 Oct. 2005 Mw 7.6 Kashmir earthquake, Pakistan	38.5-47.8	
		27.2-41.9	5.9-11.3
	12 May 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake, China	6-31	
		8.5-16	1.5-5

以台灣 1999 年 9 月 21 日發生於中部的集集地震為例，地震矩規模 Mw = 7.6，造成地表破裂長約 100 公里，包括南段大致上呈南北走向的 80 公里及北段呈東北東走向約 20 公里的破裂。南段的地表破裂在大部份區域以變形帶(deformation zone)形式出現，變形帶的西側為一高差顯著的地震斷層崖或撓曲崖(圖 2)，此地形崖通常為此次地震斷層切出地表或下伏的位置，若以其為依據變形帶的寬度極不對稱，上盤的變形帶寬遠大下盤，北段也有類似的現象，若整體的構造形式更顯複雜些。根據目前收集到的精細大比例尺的地震變形帶圖(e.g. Kelson et al., 2001; Huang and Johnson, 2010)，推估地表破裂帶寬約 50~350 公尺，上盤變形帶寬約 42~322 公尺，下盤約 8~28 公尺，參見圖 3。

斷層崖



褶皺崖

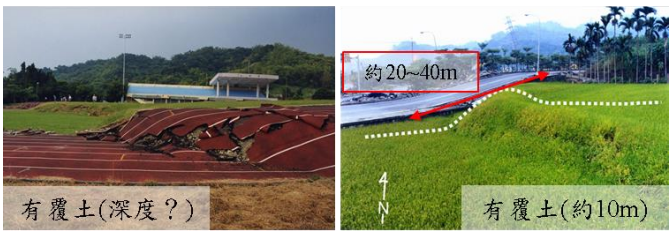


圖 2 集集地震變形帶之地形起伏形貌

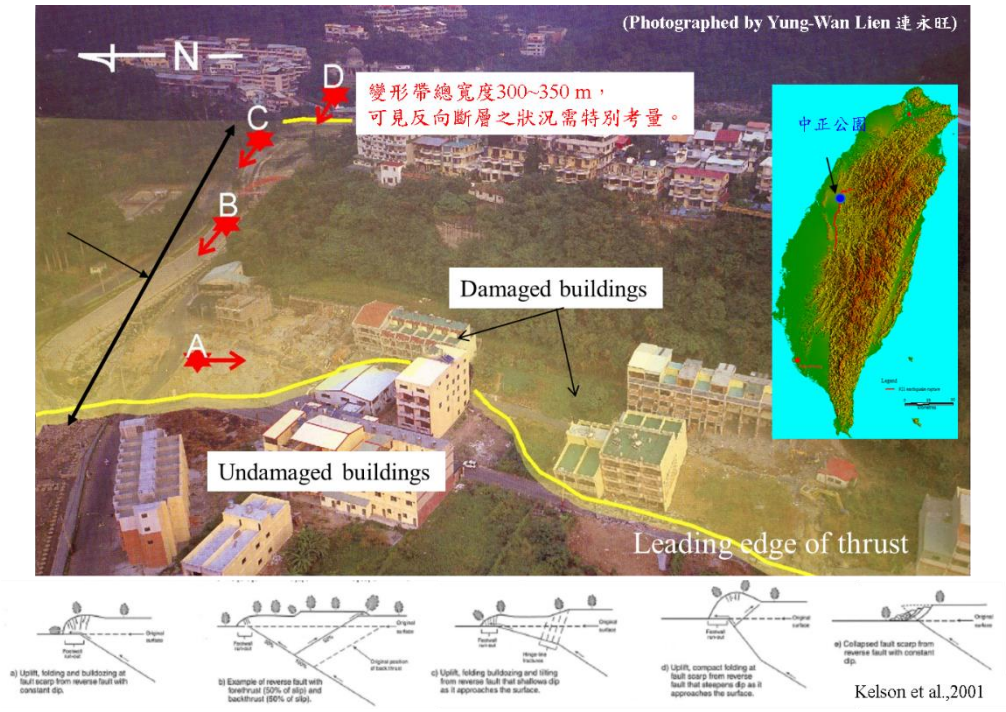


圖 3 集集地震之推估地表破裂帶寬

(2) 斷層兩側覆土層之地表影響範圍

Boncio et al. (2012)即針對這次的同震地表破裂，加上 18 個正移斷層歷史地震事件，認定正移斷層同震破裂寬度與地震規模關係不大，透過統計資料分析，建議正移斷層地震斷層帶(Earthquake Fault Zone, EFZ)，於斷層上盤 150 公尺寬及於下盤 30 公尺寬；斷層避離帶(Fault Avoidance Zone or Setback)，於斷層上盤 40 公尺及下盤 15 公尺，參見圖 4，地震強度越大，則地表影響範圍有越大的趨勢，但還是要考量地質構造，且上盤影響範圍比下盤大，需注意上下盤分界的定義。

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

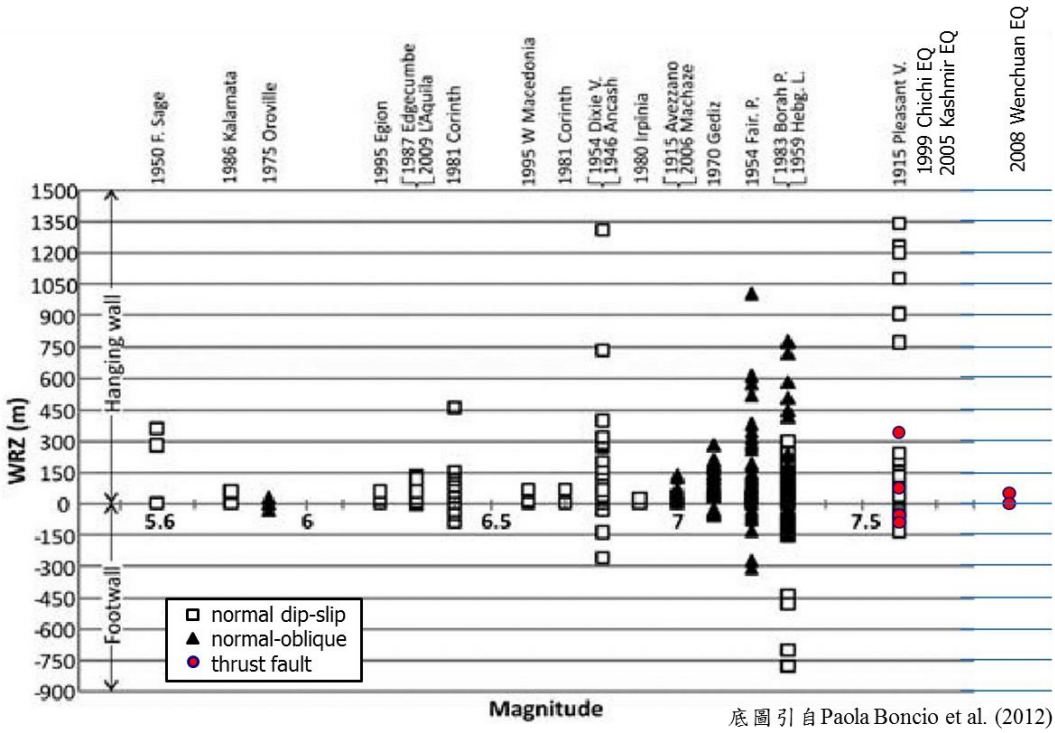


圖 4 歷史地震同震地表破裂範圍

2. 砂箱實驗

利用相似模擬來研究物理現象，藉以幫助解決理論與設計問題是工程上常用的原則，使用與原型（prototype）相同的材料且在與原型相同的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。本研究透過傾角 60 度正逆斷層通過砂土層、黏土層及砂黏土互層之離心機模型試驗，以及正逆斷層與淺基礎互制及隧道互制的離心模型 85 組離心機試驗，傾角 90 度斜移斷層通過砂土層之 1g 模型 4 組試驗，觀察地下斷層跡的發展及地表變形剖面及範圍，其成果如下：

A. 逆斷層離心模型試驗成果

離心機砂箱之斷層傾角為 60 度，在砂土試體實驗結果中得到覆土層之影響範圍約為 **1 倍覆土層厚度**；在黏土試體實驗結果中得到覆土層之影響範圍約為 **2.2 倍覆土層厚度**(圖 5)。而在砂黏土互層試體實驗結果中可以看到，砂土覆蓋在黏土層上地表變形較平緩，且影響範圍較廣。而黏土層覆蓋在砂土層上面，相對於前者，則相反過來；黏土層的剪力強度減少，坡度變緩，其影響範圍也隨著增加(圖 6)。

B. 正斷層離心模型試驗成果

離心機砂箱之斷層傾角為 60 度，在砂土試體實驗結果中得到覆土層之影響範圍約為 **0.8 倍覆土層厚度**；在黏土試體實驗結果中得到覆土層之影響範圍約為 **1.9 倍覆土層厚度**(圖 7)。而在砂黏土互層的試體中可以看到，若黏土覆蓋在砂土尚且黏土強度較高，則錯動後的地表裂縫較窄，發生地表斷層裂縫地點較遠離斷層跡出露地表處，黏土層厚度較厚者且會發生兩個階；而黏土層厚度較薄者，垂直裂縫較深，且只發生一個階。土壤強度較低者，斷層地表影響範圍較寬，垂直裂縫最淺且地表斷層裂縫處較接近斷層跡出露地表處(圖 8)。

C. 斜移斷層 1g 模型試驗成果

斜移斷層錯動達 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(圖 9)。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 **1.5 倍覆土層厚度**以內。

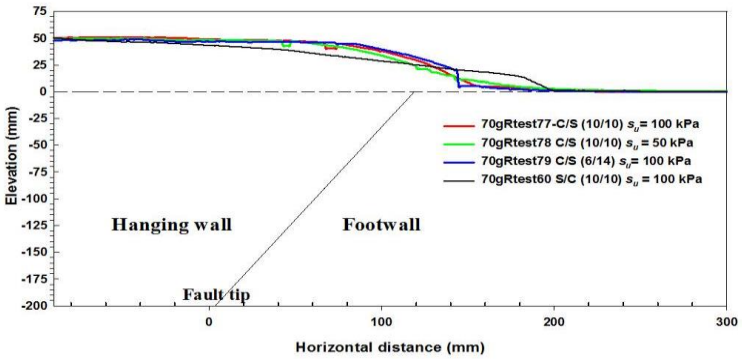


圖 5 不同剪力強度純黏土及砂試體逆斷層錯動試驗，地表剖面結果比較

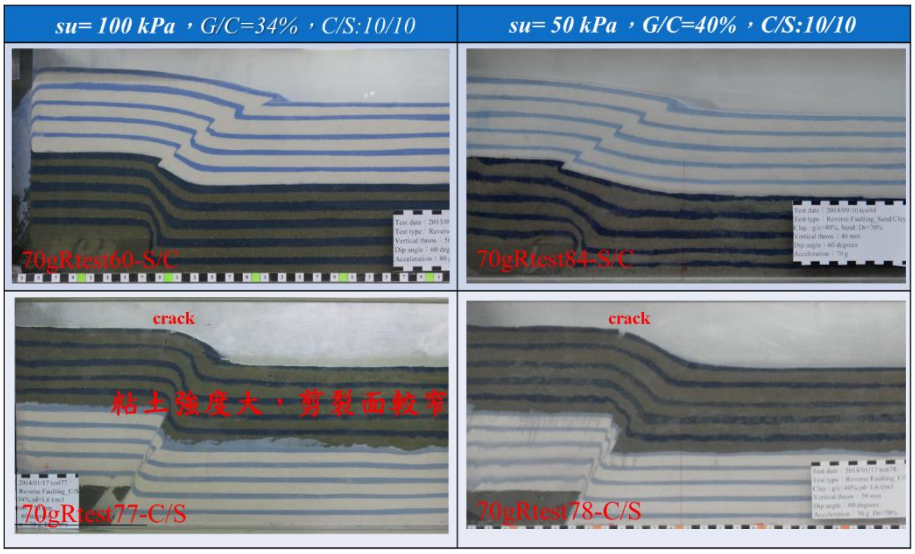


圖 6 不同土層逆斷層錯動試驗，垂直抬升量 5 cm，地下斷層跡剖面的比較。

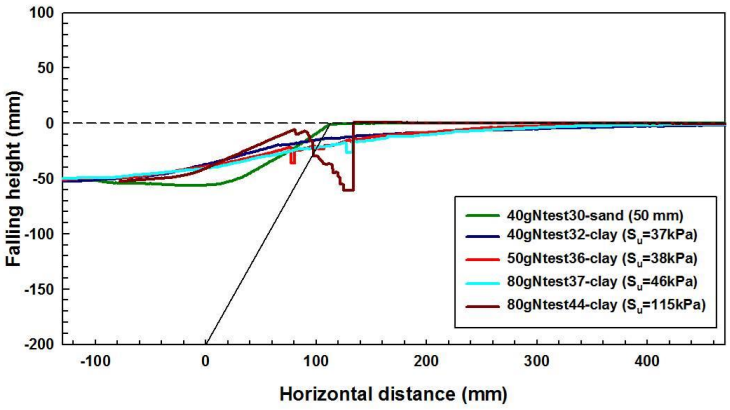


圖 7 不同剪力強度純黏土及砂試體正斷層錯動試驗，地表剖面結果比較

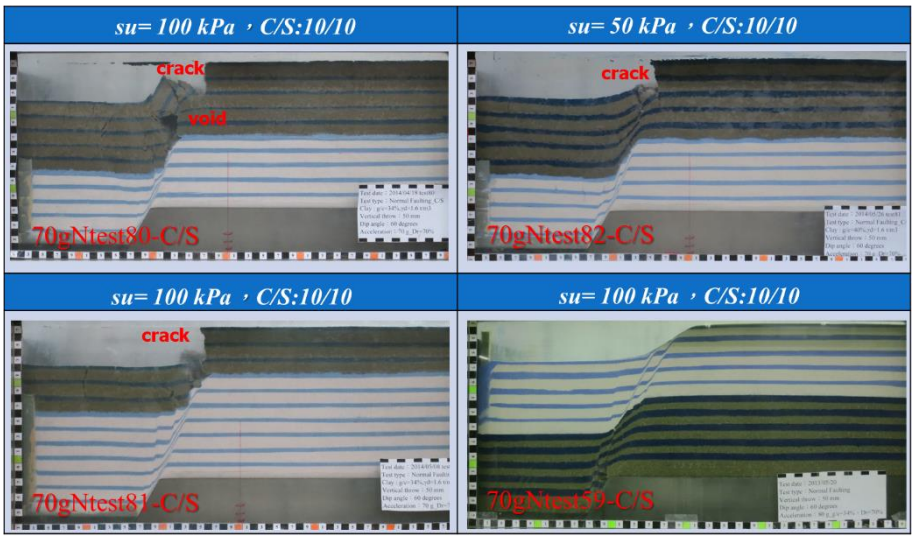


圖 8 不同土層正斷層錯動試驗，垂直陷落量 5 cm，地下斷層跡剖面的比較。

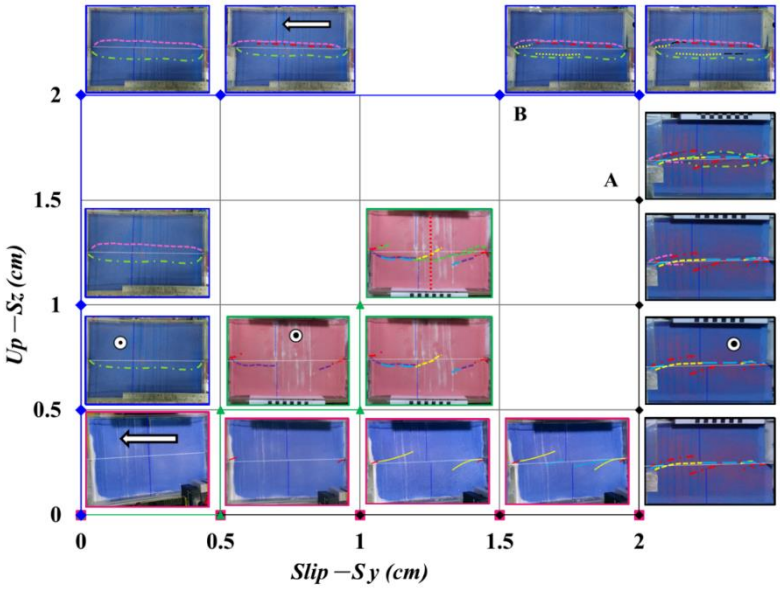


圖 9 橫移砂箱試驗之地表破裂跡歷程

不同覆土層材料對變形帶影響範圍，進行疊合對比如圖 10，可知砂土覆蓋黏土時，地表變形較平緩，並無地表裂縫產生，且地表變形的影響範圍最寬廣。黏土覆蓋砂土時，相對於砂土覆蓋黏土之地表變形有較陡的邊坡，並產生地表裂縫，地表變形的影響範圍也較窄。黏土覆蓋砂土時，黏土層的剪力強度減少，則坡度變緩，其影響範圍也隨著增加，產生較寬的剪切帶。反之黏土之剪力強度越大 ，可自立的高度較高，因此會形成陡坡；但是若黏土層厚度超過自立高度，則仍然形成較平緩的邊坡，黏土覆蓋砂土時，黏土層較薄時，則產生較寬的剪裂帶。影響範圍歸納斷層類型對試驗覆土層影響範圍如表 2。

表 2 試驗結果單一斷層傾角之地表影響範圍

地表影響範圍	砂土層	黏土層
逆斷層 (60度斷層)	1.0H	2.2H
正斷層 (60度斷層)	0.8H	1.9H
斜移斷層(90度斷層)	1.5H	

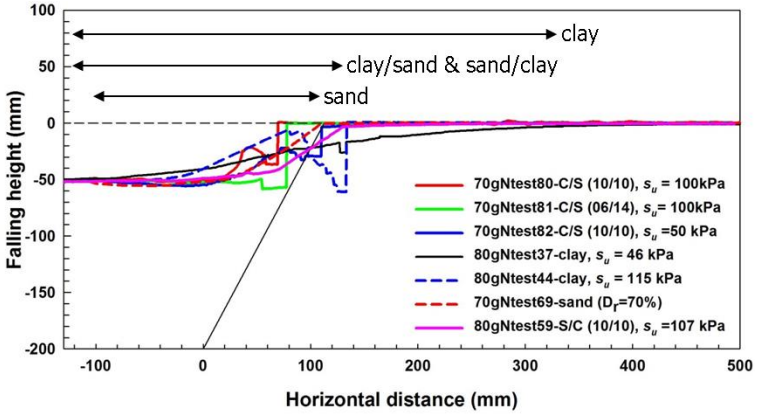


圖 10 不同覆土層材料對變形帶影響範圍比較

3. 數值模擬

利用 PFC2D 模擬不同傾角及不同覆土層強度的正逆斷層錯動，觀察地下斷層跡的發展及地表變形剖面及範圍。綜合研析離心模型試驗資料及數值模擬的結果，提出在此範圍內的地表變形剖面的斜率超過 1/150，可能會造成結構物的損害，適合活動斷層之地表變形範圍的經驗公式及圖表如下：

(1) 逆斷層影響範圍預估公式

在不同之斷層傾角及不同基盤垂直錯動對土層厚度(H)之正規化比值 r 下 x_{1m}、x_1 及 x_2 之最大影響範圍包絡線。可由包絡回歸之方式得 x_{1m}、x_1 及 x_2 之最大影響範圍，其包絡回歸方程是分別為：

I. 當斷層傾角小於等於 37.5°時，r>0

上盤影響範圍為：$\mathbf{x_{1m} = -1.133 - 0.026r}$、下盤影響範圍為：$\mathbf{x_2 = 1.282 + 0.037r}$、出露點位置為：$\mathbf{x_{outcropping} = 1.102 + 0.031r}$

II. 當斷層傾角大於 37.5°時，r>0

上盤影響範圍為：$\mathbf{x_1 = -0.612 - 0.022r}$、下盤影響範圍為：$\mathbf{x_2 = 1.282 + 0.037r}$、

出露點位置為：$\mathbf{x_{outcropping} = 1.102 + 0.031r}$

(2) 正斷層影響範圍預估公式

在不同之斷層傾角及不同基盤垂直錯動對土層厚度(H)之正規化比值 r 下，所有對應的斷層影響範圍邊界x1及x2,左右2條參考線是考量最大之安全係數，即最大影響範圍包絡線，其包絡回歸方程是分別為：

I. 當 0<r<3%時

上盤影響範圍為：$\mathbf{x_1 = -0.02 - 0.025r}$、下盤影響範圍為：$\mathbf{x_2 = 0.01 + 0.08r}$

II. 當 r>3%時

上盤影響範圍為：$\mathbf{x_1 = -0.232 - 0.039r}$、下盤影響範圍為：$\mathbf{x_2 = 0.198 + 0.029r}$

4. 斷層與結構物互制關係

台灣常見之建物基礎型式為淺基礎(shallow foundation)、樁基礎(pile foundation)、沉箱基礎(caisson)以及隧道(tunnel)或維生管線(utility pipeline)等，有為數不少建物之基礎靠近可能之斷層帶，一旦斷層發生錯動，若基礎本身建築於上盤或下盤,或甚至是橫跨斷層線,都可能會使得基礎,乃至於建築物發生損壞，造成生命財產的損失。基礎座落於地下，其相對於斷層線的距離、斷層本身錯動量及位移特性以及土壤性質等，均會影響到兩者之間互制之關係，因此相關文獻中對於不同基礎型式在受到斷層錯動時之受力與變形特形進行實驗、數值分析以及現地調查，以了解其受力變形特性。

(1) 結構物位於逆斷層覆土層之上

以基礎位於逆斷層下盤而言，載重愈大，基礎旋轉角愈小，以五層樓高之建築載重為例，當斷層錯動量為地層厚度 25%時，其旋轉角約在 5 度左右。以基礎位於上盤，且為五層樓高之載重而言，基礎寬度愈寬，其旋轉角度愈小。基礎跨過斷層帶時之旋轉角度最大，當斷層錯動量為地層厚度 25%時，其最大旋轉角約在 25 度左右。

(2) 結構物位於正斷層覆土層之上

基礎位於上盤或下盤位置時，基礎旋轉角度均較基礎跨過斷層線之值小，基礎位於下盤位置時，其水平位移及垂直最小，離心機實驗結果與前述文獻說明之

結果類似，以淺基礎座落於正斷層下盤為較佳之選擇，就載重而言，結構物載重越大，基礎旋轉角度越小。

(3) 以工程方式解決斷層錯動對結構之影響

Oettle 與 Bray 在 2013 年亦提出地震引致地表破裂時之基礎工程破壞防治對策如下：

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，可避免結構受過大之力矩。
2. 讓**基礎產生剛體位移以避免結構損壞**：使用較厚或鋼筋比較高之鋼筋混凝土基礎版，則其對於基礎上方之結構物有較高能力之抵抗；當基礎版厚度愈厚時(不論正逆斷層)，其結構之樓地板所受力矩大幅下降(且不達到降伏力矩)
3. 使**靠近地表之破裂點轉向並避開結構物** ：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、設置高強度之地下室結構等，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

5. 機率式斷層位移危害度分析(PFDHA)

由於近年來鄰近斷層重大設施之可靠度受到社會大眾極高的重視，Youngs et al (2003)針對美國核廢料儲存場址 Yucca Mountain 相對於斷層所在位置，提出評估斷層錯動下位移量超越機率之方法，以探討某場址在使用年限下之結構安全性，此一方法稱為機率式斷層位移危害度分析(PFDHA, Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis)

PFDHA 可用地震法以及位移法進行主斷層以及遠離主斷層之可能位移量評估。地震法主要仰賴各不同性質斷層(正斷層、逆斷層或平移斷層)之經驗公式，以評估在某可能地震規模下，發生地表破裂之機率，並找出沿主斷層線或遠離主斷層線不同位置對應之位移超越機率，以對於某場址之可能位移量進行評估。位移法主要利用斷層挖溝或是歷史資料定年之方式找出該地點之事件滑移速率以及事件平均位移量，對於位移超越機率部分，則可考慮使用正規化位移量搭配統

計上較常用之分佈曲線(如 Gamma 分佈)，以進行後續計算。

研究針對平均位移量或最大位移量之推估進行探討，並將如台灣集集地震(1999)以及中國汶川地震(2009)等八個逆斷層錯動事件列入資料庫內進行分析，提出評估之經驗公式(AD，MD 單位均為公尺，m 為地震矩規模)如下：

$$\log(AD) = 0.3244m - 2.2192, \sigma = 0.17, R^2 = 0.62$$

$$\log(MD) = 0.5102m - 3.1971, \sigma = 0.31, R^2 = 0.53$$

針對正斷層以及逆斷層之位移危害度分析，即可利用上述方法進行探討，並依不同斷層破裂長度，滑移速率以及迴歸年等，定出危害度曲線，以滿足工程設計所需。

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

第一章、前言

1.1 計畫背景

臺灣由於位在「環太平洋地震帶」上，所以有感地震頻繁，從有系統的地震研究可知，近百年來，臺灣曾發生多次重大災害性地震，從 1904 年斗六大地震、1906 年梅山地震、1916 年南投地震、1935 年新竹-台中地震、1946 年新化地震、1951 年的花東縱谷地震、1964 年白河地震、1998 年瑞里地震與最近的 1999 年集集地震等，這些災害性地震主要肇因於斷層的活動。

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、土壤液化與邊坡滑動等，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，針對 20 世紀所發生的災害性地震與活動斷層間之關係，根據地調所 2012 年出版之臺灣活動斷層分布圖(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。

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。

1.2 研究目的

由於斷層活動時引發地表的破壞、變形行為及變形範圍與斷層類型、傾角及兩側岩層特性、厚度有密切的關係，透過分析本所既有成果（槽溝開挖、地質鑽探、地球物理探勘、地殼變形觀測等）與鄰近地區之工程地質鑽探資料，配合現地鑽探試驗所蒐集的地表岩層特性、力學性質等資料，可以推求各斷層近地表的變形特性、分析變形之主控因子與相關參數，及結構物因應減災之方式，以達成下列目的：

1. 探討斷層兩側覆土層變形行為(包含剪切帶發展、遷移及影響參數等)
2. 斷層錯移在近地表可能影響範圍。
3. 提出較合理的安全性探討指標，作為判斷建築物或設施安全性的參考。
4. 提供重要公共工程規劃與營運風險之參考。

1.3 研究方法

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，三者之功用、目的與相互間之關係，如圖 1.1.2 所示。本計畫之研究為突破單一方法學提出結果之侷限性，因此併用現地調查、物理模型實驗(離心機逆、正斷層砂箱試驗、1g 橫移斷層砂箱實驗)及數值分析之方法，分別進行基本行為觀察及定量分析。

1.4 分年研究項目

斷層活動與兩側岩層之互制關係相當複雜，再者完整分析斷層沿線相關岩層分布情況與斷層變形形貌資訊對於日後進行同類型斷層之驗證與模式修正相當重要，本研究前三年之研究對象分別為車籠埔斷層(**第一年**－逆斷層)、山腳斷層(**第二年**－正斷層)、米崙斷層(**第三年**－橫移斷層)，透過不同方式所收集到的鑽井資料，整理成建議之簡化剖面。第四年研究針對簡化剖面設立室內試驗與數值模擬，綜合研析前三年之資料，提出適合臺灣活動斷層之變形模式與範圍之經驗

式及圖表，探討臺灣活動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。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。

表 1.1.1 台灣活動斷層參數資料表(中央地質調查所，2010)

台灣活動斷層參數資料表

2010.05 版

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

斷層名稱	分類	長度(km)	滑移特性	斷層傾角(度/方向)	GPS跨斷層水平速度變化(mm/yr)		跨斷層垂直速度變化(mm/yr)			短期滑移速率(mm/yr)	長期滑移速率(mm/yr)	再現週期(yr)	最近一次活動時間(yr)	可能最大地震規模(M)
					平行斷層走向	垂直斷層走向	精密水準	GPS	地質證據					
17 六甲斷層	一	16*	逆移兼左移 g	~30/東 g	+2.0 ± 3.6b	2.3 ± 2.9b	0.3g	9.3 ± 8.4b	5.6±2.0n 6.33±0.06o	15.1-22.9 v	12.7o 11.2±4.0f	(430)b	<10,000g	(6.5)
18 觸口斷層	一	27*	逆移 g	50-60/東 g	+3.2 ± 4.2b	11.1±3.4b	3.1g	3.8 ± 7.2b		5.3-16.7b		(1314)b	<10,000g	(6.8)
19 新化斷層	一	6g	右移 g	>60g	+8.8 ± 3.9b	1.6 ± 4.2b	-5.0g	3.2 ± 8.9b		11.4 v		(188)b	A.D.1946	6.1 (6.0)
20 後甲里斷層	二	12g	逆移 g	>35/西 g	+3.5 ± 2.8b	6.2 ± 3.8b	7.9g	-0.4 ± 7.6b	5~6g	5.2-9.5b	5.4~5.5◎	(936)b	更新世晚期 g	(6.3)
21 左鎮斷層	二	13*	左移 g	>60/北 g	-1.4 ± 8.6b	6.3 ± 7.9b	-	4.1 ± 7.9b					更新世中晚期 g	(6.2)
22 小崗山斷層	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)		跨斷層垂直速度變化(mm/yr)			短期滑移速率(mm/yr)	長期滑移速率(mm/yr)	再現週期(yr)	最近一次活動時間(yr)	可能最大地震規模(M)
					平行斷層走向	垂直斷層走向	精密水準	GPS	地質證據					
33 利吉斷層	二	25*	逆移 h	67/東 o	-20~30r	10~20r	2r		~3o		12.2~13.3◎		更新世晚期 s	(6.5)

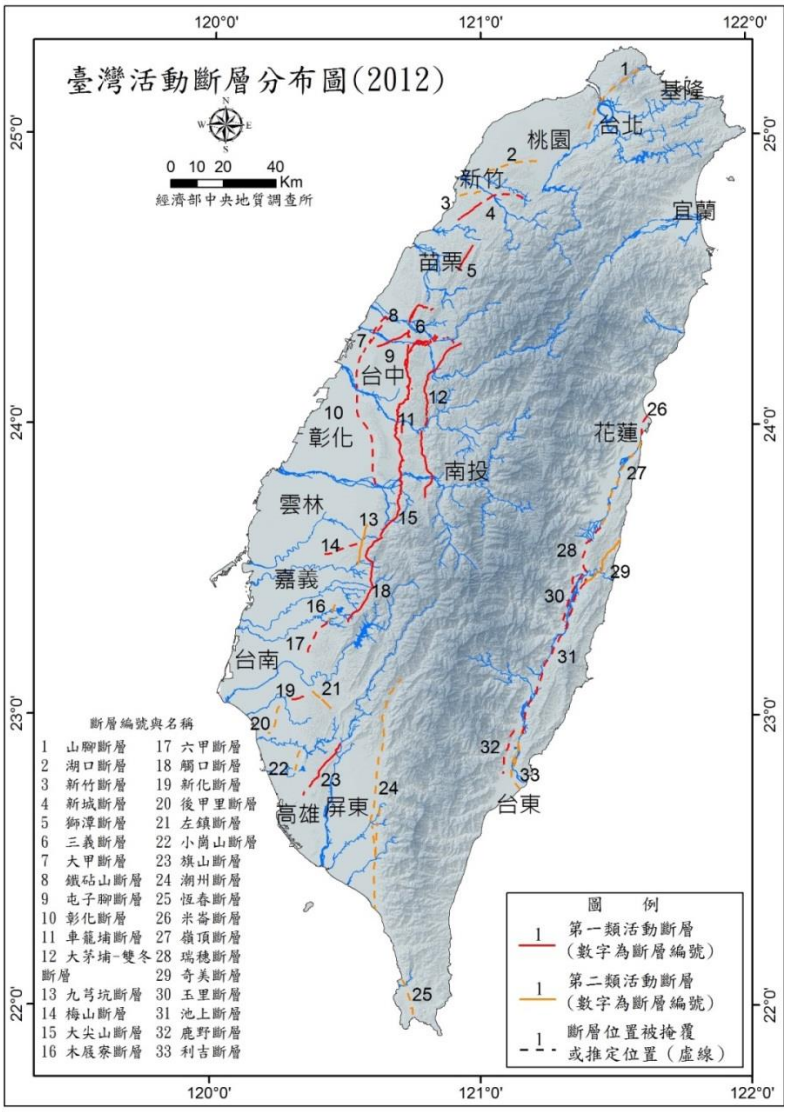


圖 1.1.1 台灣活動斷層分布圖(中央地質調查所，2012)

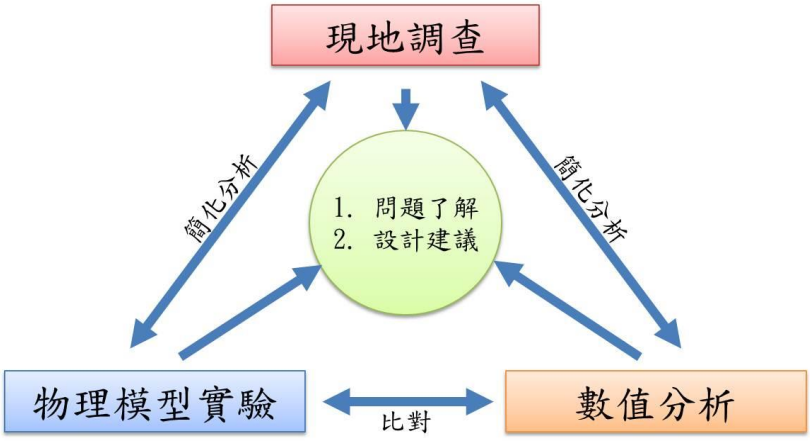


圖 1.1.2 三種研究方法間之整合關係

第二章、國內外文獻回顧及現地調查

2.1 斷層兩側覆土層之變形行為及地表影響範圍

1999 年的集集地震及同年的兩次規模七級以上的土耳其地震，讓世人對同震斷層引致地表變形的觀念，有顯著的改變。不再僅專注在地表斷層錯動量最大的斷層跡或顯著的斷層(撓曲)崖上，同時也開始記錄斷層地表跡兩側的次要破裂及變形情形，也開始利用較精密的測量儀器，定量化地觀察，進而判釋地震斷層錯動的影響範圍。表 2.1.1 中收錄了 16 篇發表於 2001 年後，有關同震地表破裂的文章，相關的地震包括最早的 1997 年委內瑞拉芮氏規模 Ms6.8 的地震，到 2011 年日本 411 的 Hamadori 地震，共計有 11 個地震事件，以其相關的斷層滑移特性，分成正移斷層地震事件兩起、橫移斷層地震事件六起，逆移斷層地震事件三起，收錄於表 2.1.2 中。

表 2.1.1 同震地表破裂相關的歷史地震

期刊名稱	篇數 (發表年份)		相關地震 (1997年至今)
BSSA[1]	7	Nf: 2 (2012[a]; 2013[b])	6 April 2009 Mw 6.3 L'Aquila earthquake, Italy
			11 April 2011 Mw 6.6 Hamadori earthquake, Japan
		Ssf: 2 (2002[c]; 2012[d])	16 Oct. 1999 Hector Mine earthquake, Ca, USA
			6 March 2007 M >6 earthquake doublet, Indonesia
		Rf: 3 (2001[e]; 2008[f]; 2010[g])	21 Sept. 1999 Mw 7.6 Chichi earthquake, Taiwan
			8 Oct. 2005 Mw 7.6 Kashmir earthquake, Pakistan
			12 May 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake, China
JGR[2]	2	Ssf: 1 (2006[h])	14 Nov. 2001 Mw 7.8 Kunlunshan earthquake, China
		Rf: 3 (2010[i])	21 Sept. 1999 Mw 7.6 Chichi earthquake, Taiwan
Tectonophyics	3	Ssf: 2 (2005[j]; 2006[k])	17 and 21 June 2000 Ms 6.6 earthquakes, Iceland
			9 July1997 Ms 6.8 earthquake, Venezuela
		Rf:1 (2010[l])	12 May 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake, China
JSG[3]	2	Ssf: 1 (2004[m]; 2011[n])	14 Nov. 2001 Mw 7.8 Kunlunshan earthquake, China
Other [4]	2	Ssf: 1 (2008[o]; 2012[p])	14 Nov. 2001 Mw7.8 Kunlunshan earthquake, China
			4 Sept. 2010 Mw7.1 Darfield earthquake, New Zealand

1BSSA: Bulletion of theSeismological Society of America ;2JGR: Journal of Geophysical Research-solid earth; 3Journal of Structural Geology; 4Science in China Series D: Earth Science.

aBoncio et al. (2012); bLin et al. (2013); cTreiman et al. (2002); dDaryono et al. (2012); eKelson et al. (2001); fKaneda et al. (2008); gRen et al. (2010); hXu et al. (2006); iHuang and Johnson (2010); jClifton and Einarsoon (2005); kAudemard (2006); lLi et al. (2010); mLin et al. (2004); nLin et al.(2011); Xu et al. (2008); pVillamor, P. (2012).

註：Nf:正移斷層，Ssf:橫移斷層，Rf：逆移斷層

表 2.1.2 歷史地震同震地表破裂

斷層錯動類型	相關地震	引致破壞帶或變形帶寬(公尺)	
		上盤	下盤
正斷層	6 April 2009 Mw 6.3 L'Aquila earthquake, Italy	170	
		140	30
	11 April 2011 Mw 6.6 Hamadori earthquake, Japan	5-50	
橫移斷層	9 July1997 Ms 6.8 earthquake, Venezuela	5~10	
	16 Oct. 1999 Hector Mine earthquake, Ca, USA	10~500 (ave. 50)	
	17 and 21 June 2000 Ms 6.6 earthquakes, Iceland	2~50 (ave. 25)	
	14 Nov. 2001 Mw7.8 Kunlunshan earthquake, China	1~8,000	
	6 March 2007 M >6 earthquake doublet, Indonesia	2~8	
	4 Sept. 2010 Mw7.1 Darfield earthquake, New Zealand	30~300	
逆斷層	21 Sept. 1999 Mw 7.6 Chichi earthquake, Taiwan	50~350	
		42~322	8~28
	8 Oct. 2005 Mw 7.6 Kashmir earthquake, Pakistan	38.5~47.8	
		27.2~41.9	5.9~11.3
	12 May 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake, China	6~31	
		8.5~16	1.5~5

2.1.1 逆移斷層地震事件

台灣 1999 年 9 月 21 日發生於中部的集集地震，地震矩規模 Mw = 7.6，造成地表破裂長約 100 公里，包括南段大致上呈南北走向的 80 公里及北段呈東北東走向約 20 公里的破裂。南段的地表破裂在大部份區域以變形帶(deformation zone)形式出現，變形帶的西側為一高差顯著的地震斷層崖或撓曲崖，此地形崖通常為此次地震斷層切出地表或下伏的位置，若以其為依據變形帶的寬度極不對稱，上盤的變形帶寬遠大下盤，北段也有類似的現象，若整體的構造形式更顯複雜些。根據目前收集到的精細大比例尺的地震變形帶圖(e.g. Kelson et al., 2001; Huang and Johnson, 2010)，推估地表破裂帶寬約 50~350 公尺，上盤變形帶寬約 42~322 公尺，下盤約 8~28 公尺，參見圖 2.1.1。

巴基斯坦 2005 年 10 月 8 日發生於 Kashmir 的地震，地震矩規模 Mw=7.6，造成地表破裂長約 70 公里，垂直的錯距(vertical separation)達 7 公尺，根據 Kaneda et al. (2008)的報導，該地震斷層引致的地表破裂帶中之變形，極似集集地震變形帶，具一高差顯著的地震斷層崖或撓曲崖，由該團隊量測地變後的變

形帶地表剖面，推估寬約 38.5~47.8 公尺，上盤的變形帶寬 27.2~41.9 公尺，下盤為 5.9~11.3 公尺，參見圖 2.1.2。

中國 2008 年 5 月 12 日發生於汶川的地震，地震矩規模 Mw = 7.9，造成相對複雜的地表破裂，主要沿龍門山斷裂帶中的兩條逆衝斷層破裂，造成兩道分別為 240 公里及 72 公里的地表破裂帶(Ren et al., 2010)。兩破裂帶中的變形類似前兩個地震，由 Li et al. (2010) 量測的地變後的變形帶地表剖面，推估寬約 6~31 公尺，上盤的變形帶寬 8.5~16 公尺，下盤為 1.5~5 公尺，參見圖 2.1.3。

2.1.2 正移斷層地震事件

義大利中部 2009 年 4 月 6 日的 L'Aquila 地震，是相當有名的，7 名義大利科學家因為沒有預測到此起致命地震而被控殺人罪、面臨牢獄之災，引發全球譁然，還好此案於已於 2014 年 11 月 10 日獲得平反。這地震的地震矩規模不大(Mw = 6.3)，地表的破裂以裂縫(fractures)及裂隙(cracks)為主，但卻因為震央鄰近人口稠密處，造成的 308 人亡，67,000 人無家可歸。Boncio et al. (2012)即針對這次的同震地表破裂，加上 18 個正移斷層歷史地震事件，認定正移斷層同震破裂寬度與地震規模關係不大，透過統計資料分析，建議正移斷層地震斷層帶(Earthquake Fault Zone, EFZ)，於斷層上盤 150 公尺寬及於下盤 30 公尺寬；斷層避離帶(Fault Avoidance Zone or Setback)，於斷層上盤 40 公尺及下盤 15 公尺，參見圖 2.1.4。

日本 2011 年 3 月 11 日在 Tohoku 超大地震(Mw = 9.0)後的一個月，2011 年 4 月 11 日地震震源深度約為 5 公里的 Hamadori 地震(Mw = 6.3)，發生在 Fukushima 縣的沿海岸地區。主震的斷層機制解指出此為正斷層作用所致，野外的調查發生同震地表破裂約有 11 公里長，且沿既存的 Shionohira 斷層跡(亦即 Itozawa 西斷層)，並 Yunotake 斷層及 Itozawa 東斷層也有同震地表破裂分佈，參見圖 2.1.5。此地震為目前在 Tohoku 地震以來，日本陸上最大的地震，其發震的原因也因此被認為與 Tohoku 地震有密切關連。Lin et al. (2013)報導在

Shionohira 斷層及 Yunotake 斷層同震剪切帶寬可達約 5~50 公尺不等。

2.1.3 橫移斷層地震事件

南美委內瑞拉 1997 年 7 月 9 日的 Cariaco 地震，芮式規模 Ms = 6.8，震源深度約 9.5 公里，為 El Pilar 斷層右移滑動所引致，地表破裂跡長達 36 公里，由雁形排列的裂縫組成，Audemard(2006)的報導中，推估地表破裂的寬度約為 5 到公尺(圖 2.1.6)。

美國加州 1999 年 10 月 16 日的 Hector Mine 地震，地震矩規模 Mw = 7.1，造成右移的地表破裂，由斷斷續續的斷層跡及破裂所組成，總長達 48 公里(圖 2.1.7)，最大錯移量 5.25 ± 0.85 公尺(Treiman et al., 2002)，同震地表破裂圖，推估地表破裂帶寬約 10~500 公尺，又以 50 公尺寬最常見。

冰島南部 2000 年 7 月 17 日及 21 日發生兩起地震，芮式規模皆為 Ms = 6.8。7 月 17 日的地震，造成一系列北北東向，左階式(left-stepping)的破裂地表跡；7 月 21 日地震的同震破裂較無規章，基本上為斷斷續續的破裂所組成(圖 2.1.8)。由 Clifton & Einarsson(2005)報導的同震地表破裂跡圖，推估地表破裂帶寬約 2~50 公尺，又以 25 公尺寬最常見。

中國崑崙山 2001 年 11 月 14 日 Kunlunshan 地震，地震矩規模 Mw = 7.8，沿崑崙斷層最西段破裂，長達 426 公里(圖 2.1.9)，同震左移的水平最大錯移量為 7.6±0.4 公尺，破裂帶寬隨處不同，數公尺至數公里寬，最寬可達 8 公里(Xu et al., 2006)。

印尼蘇門答臘 2007 年 3 月 6 日兩起規模大於 6 的地震，分別沿蘇門答臘右移走向斷層的 Sumani 段破裂近 22 公里，及 Sianok 段破裂近 22.5 公里，根據 Daryono et al. (2012)的報導，推估地表破裂帶寬約 2~8 公尺(圖 2.1.10)。

紐西蘭 2010 年 9 月 4 日發生於南島的 Darfield 地震，地震矩規模 Mw=7.1，造成地表破裂長約 29.5±0.5 公里，寬 30~300 公尺不等，最大水平位移 5.2±0.2 公尺，最大垂直高差 1.45±0.2 公尺，平均總位移 2.5±0.1 公尺(Villamor et al., 2012)。Villamor et al. (2012)在地震發生後不久，立刻針對地表破裂進行精細的作圖，

並根據該國環境部(Ministry for the Enviroment)的準則，劃定斷層地表跡兩側各20公尺的斷層避離帶(fault avoidance zone)，提供給政府在土地利用上的參考，參見圖 2.1.11。

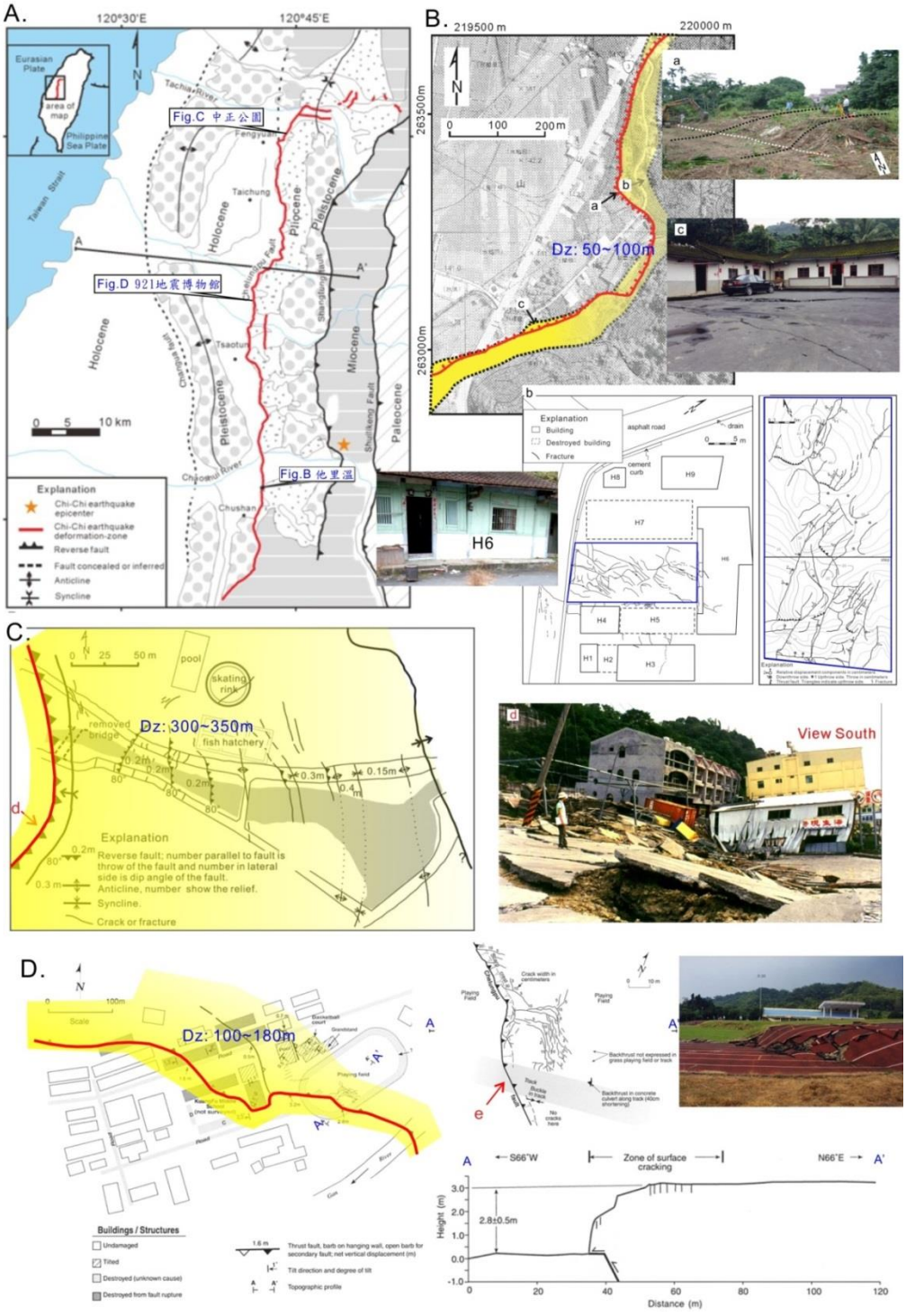


圖 2.1.1 1999 年 9 月 21 日台灣中部的集集地震之地表破裂。Dz 指地震變形帶寬。(圖取自 Kelson et al., 2001 及 Huang and Johnson, 2010)

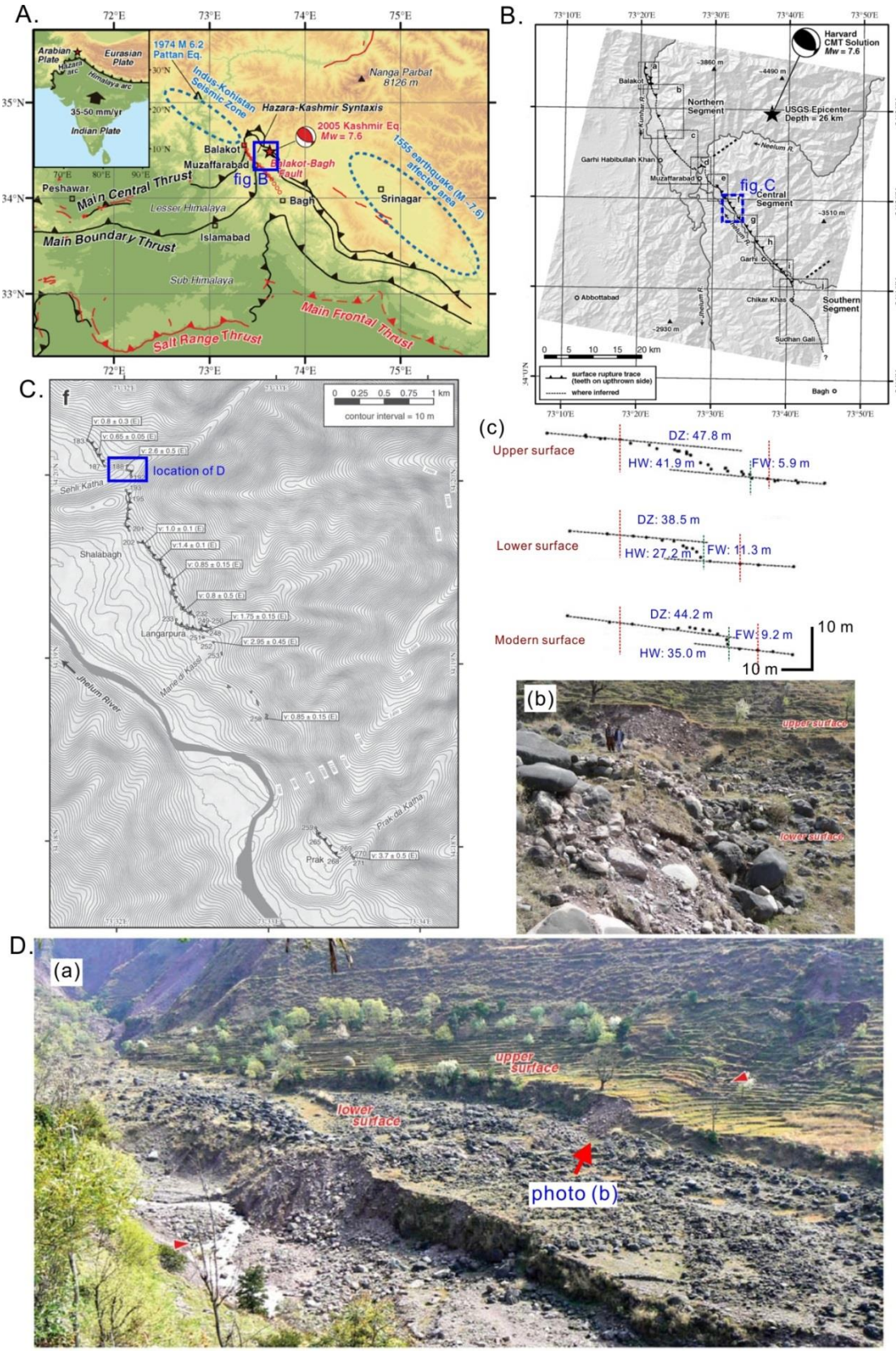


圖 2.1.2 2005 年 10 月 8 日巴基斯坦的 Kashmir 地震之地表破裂。(圖取自 Kaneda et al., 2008)

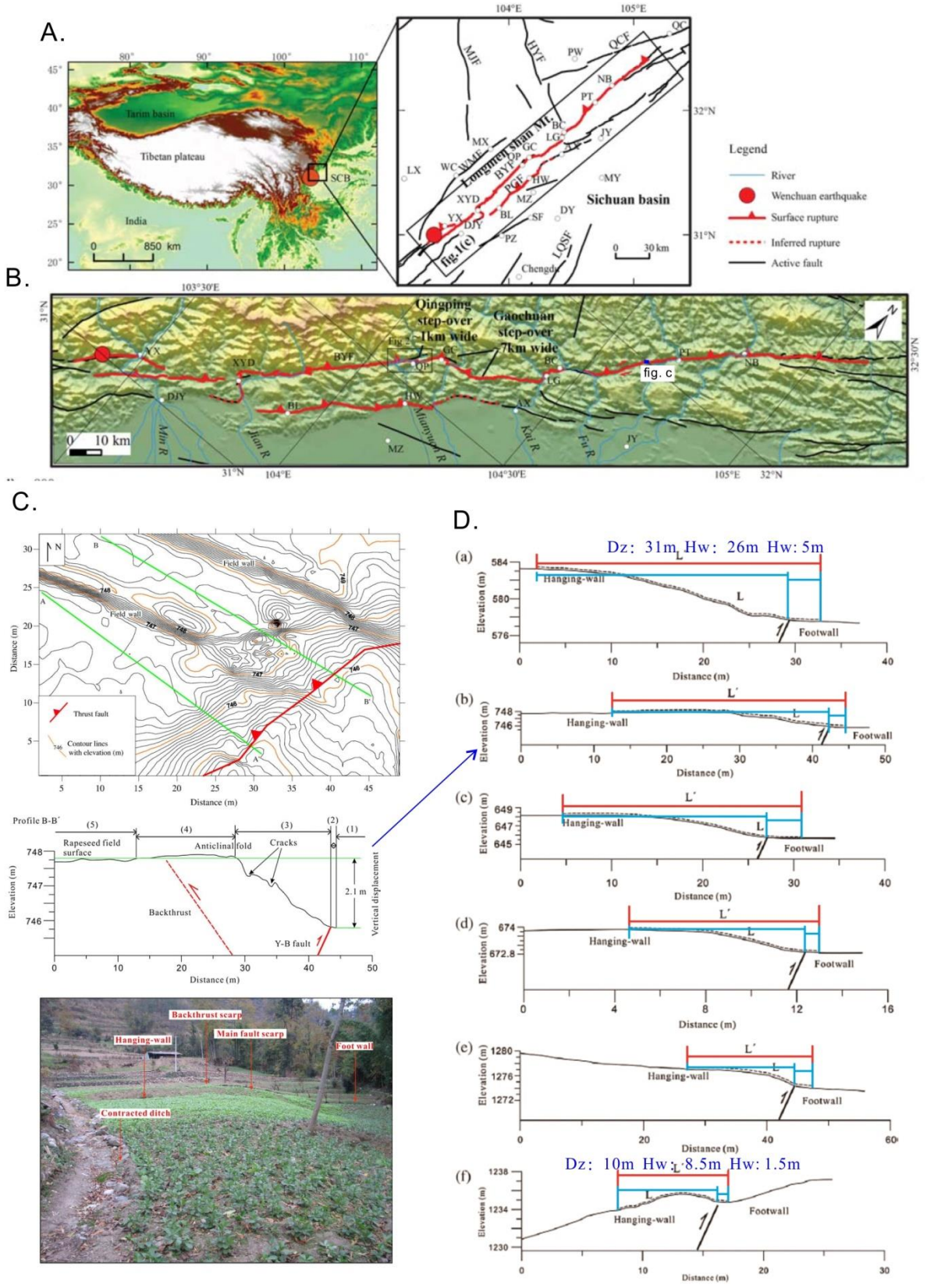


圖 2.1.3 2008 年 5 月 12 日中國的汶川地震之地表破裂。(圖取自 Ren et al., 2010 及 Li et al., 2010)

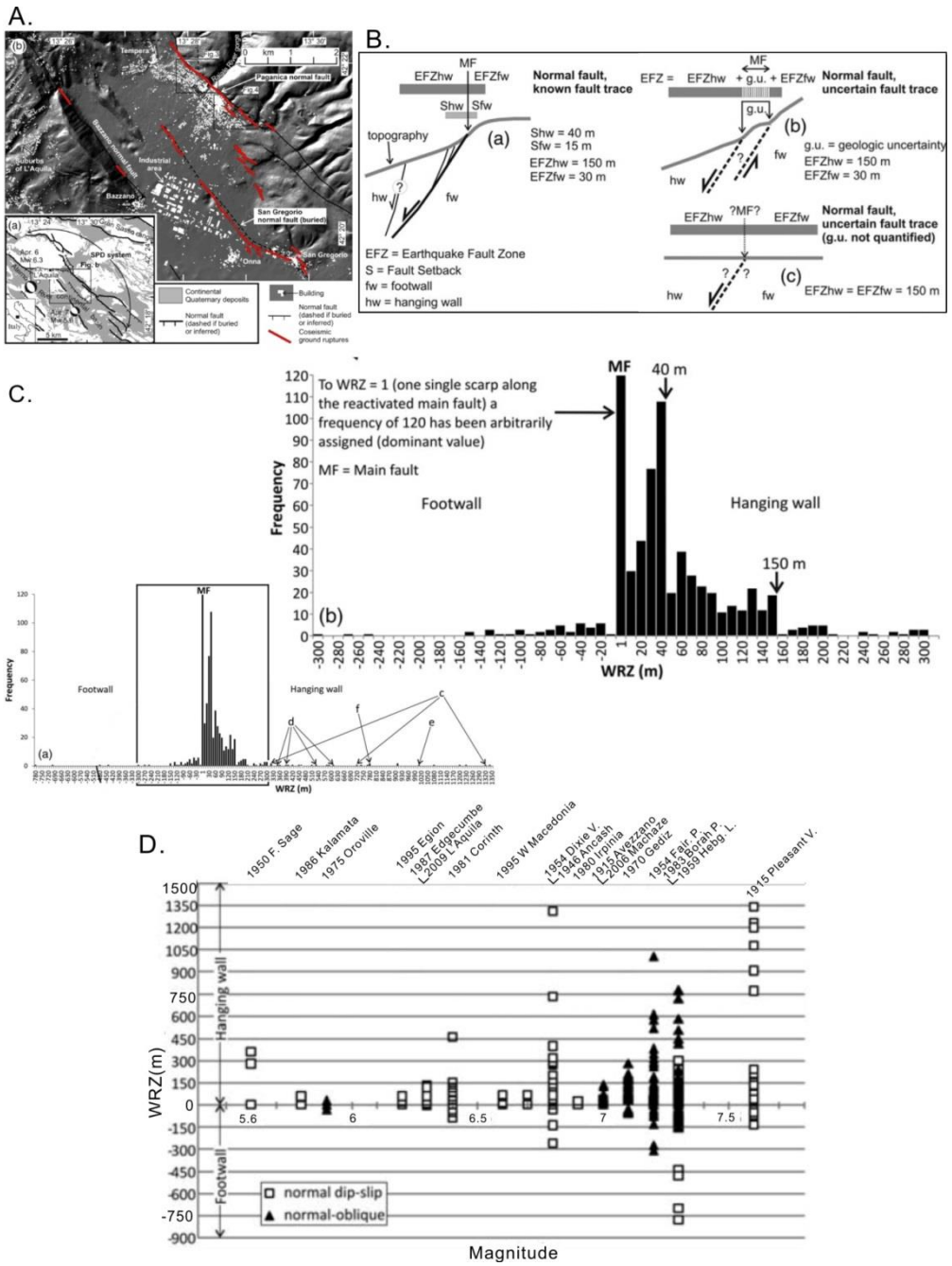


圖 2.1.4 2009 年 4 月 6 日義大利中部的 L'Aquila 地震之地表破裂。(圖修改自 Boncio et al., 2012)

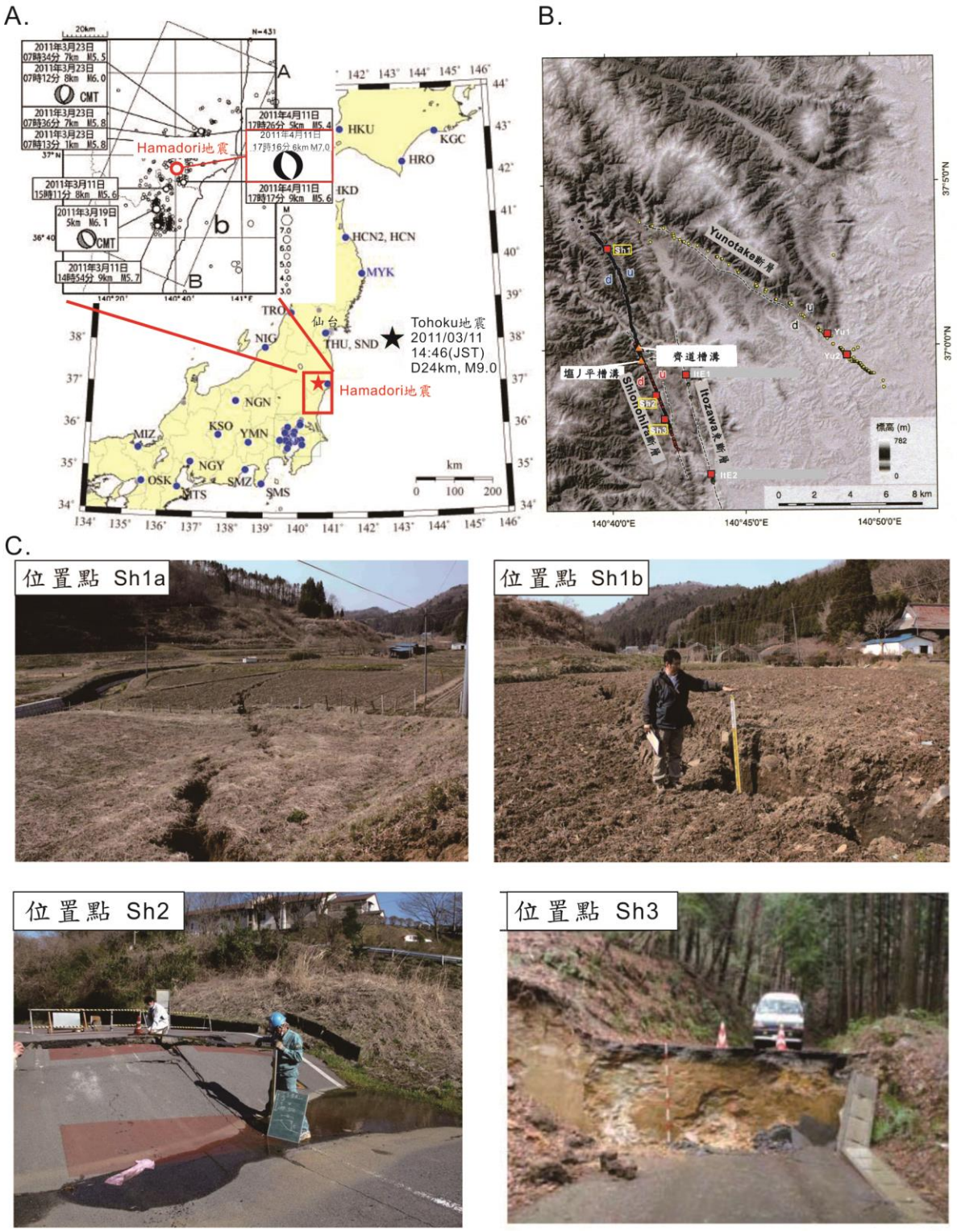


圖 2.1.5 2011 年 4 月 11 日日本的 Hamadori 地震之地表破裂。圖 B 中的紅點為同震地表破裂的位置。(資料來源 ERI 網頁。圖及照片修改或取自丸山正等，2012)

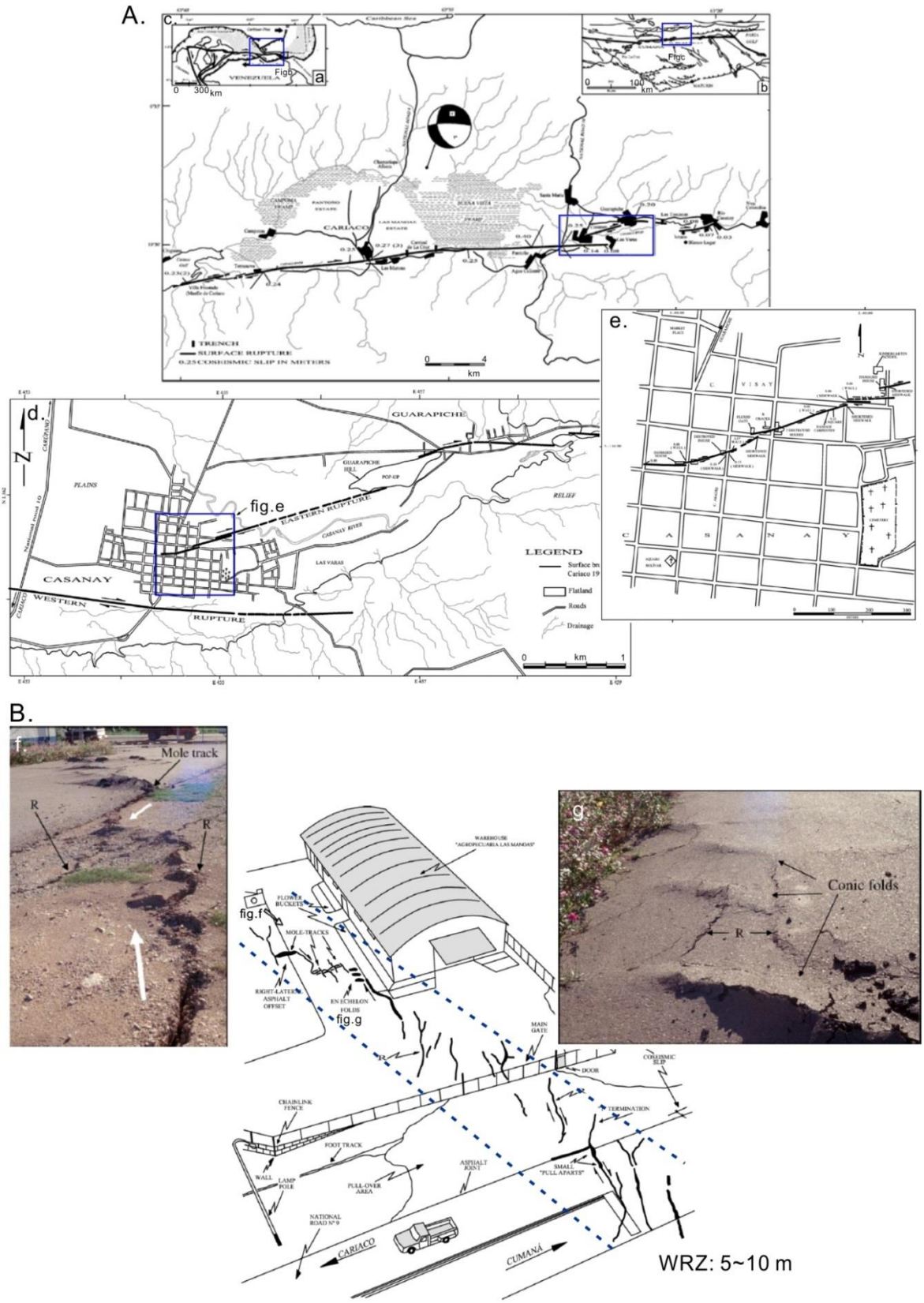


圖 2.1.6 1997 年 7 月 9 日南美委內瑞拉的 Cariaco 地震之地表破裂。WRZ 指地震地表破裂帶寬。(圖修改自 Audemard, 2006)

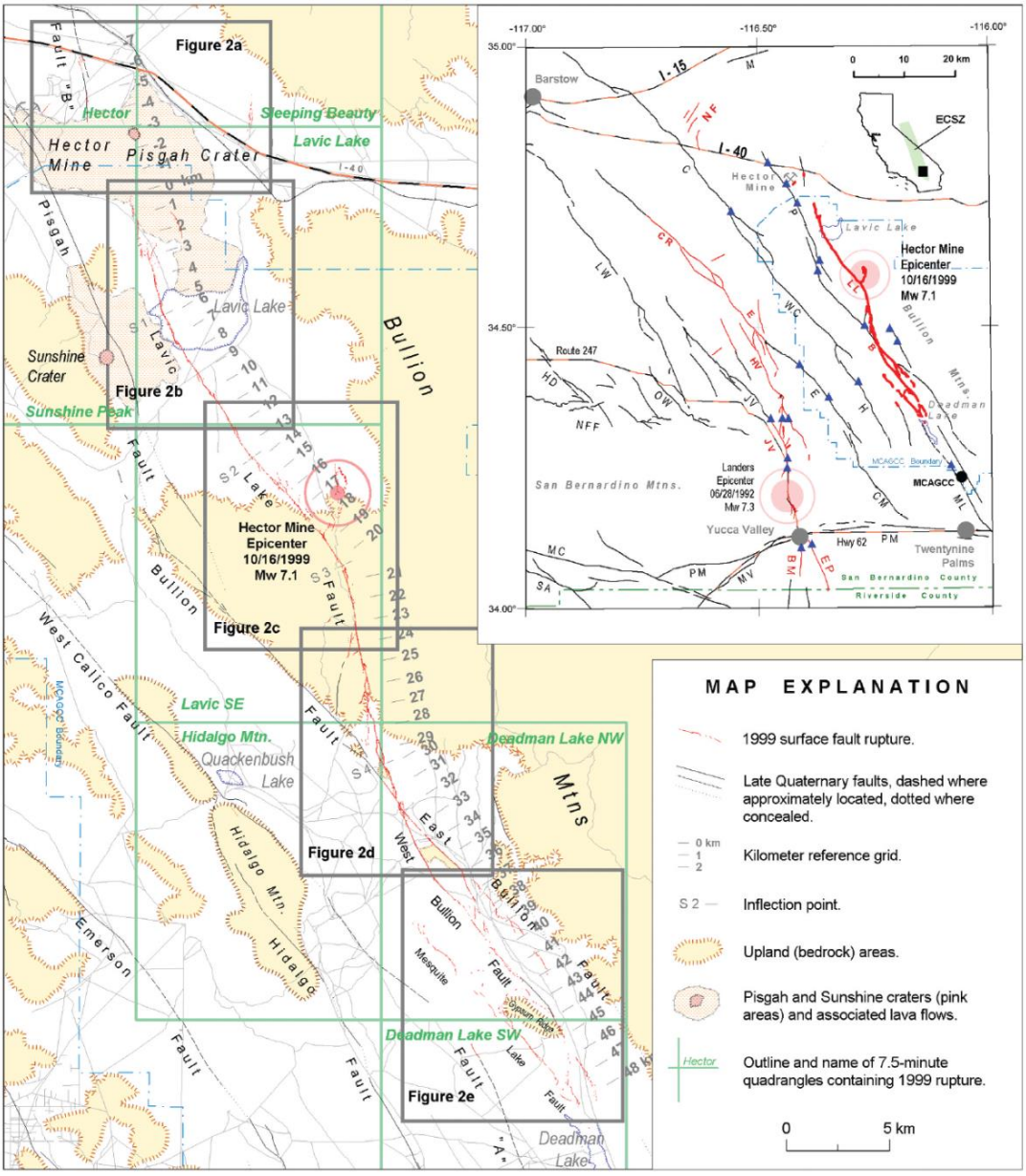


圖 2.1.7 1999 年 10 月 16 日美國加州的 Hector Mine 地震之地表破裂。(圖取自 Treiman et al., 2002)

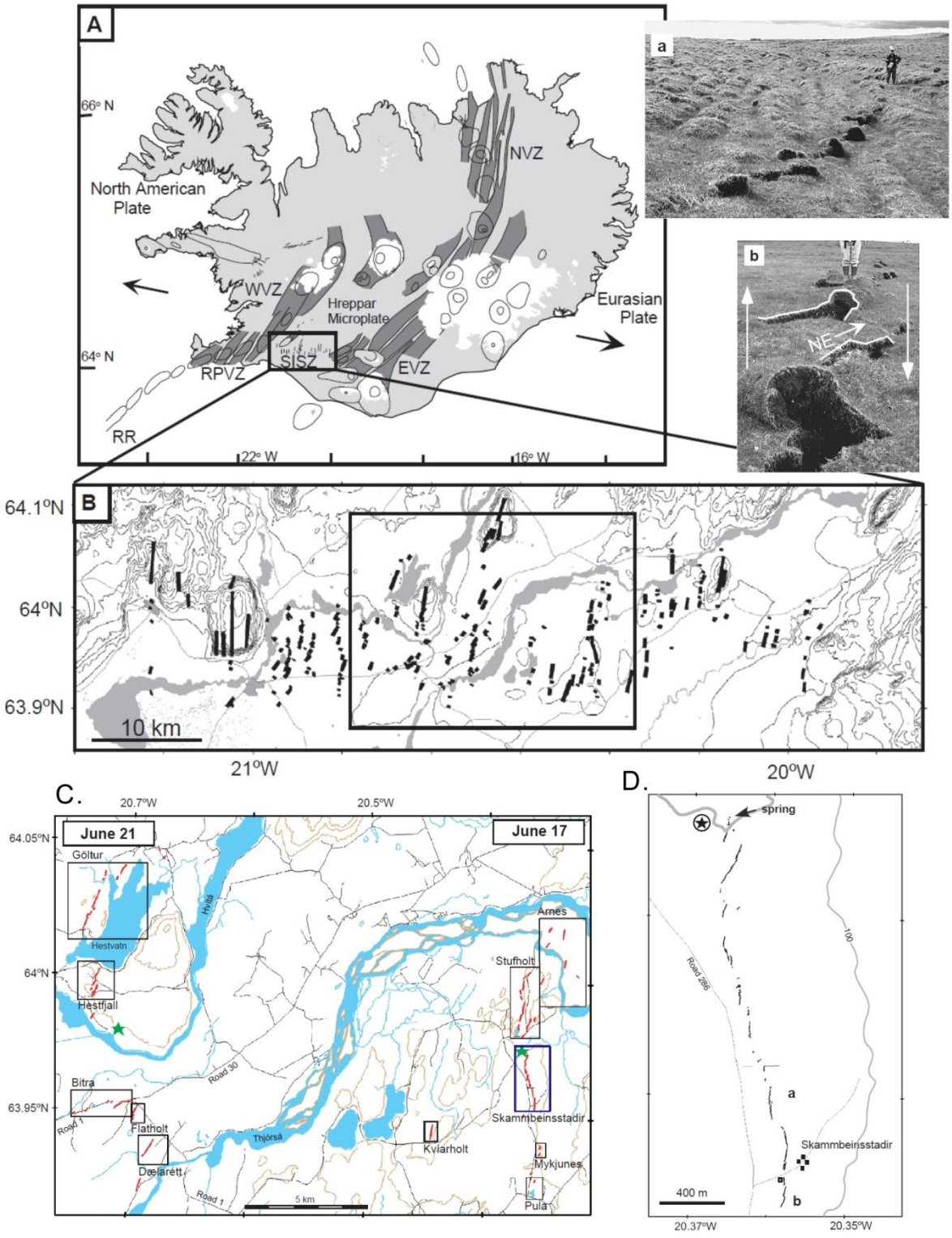


圖 2.1.8 2000 年 7 月 17 日及 21 日冰島南部的兩起地震之地表破裂。(圖取自 Clifton and Einarsson, 2005)

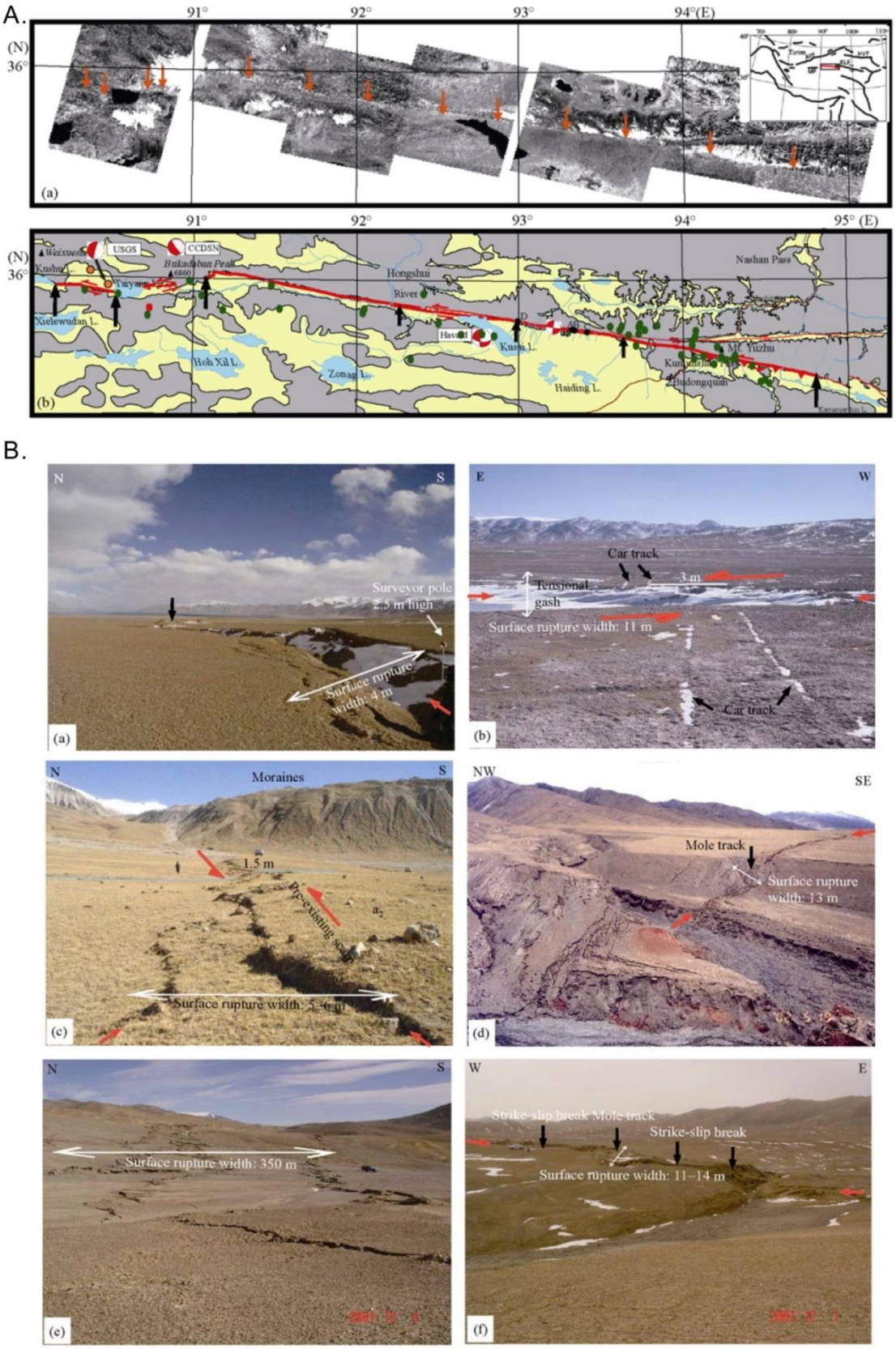


圖 2.1.9 2001 年 11 月 14 日中國的 Kunlunshan 地震之地表破裂。(圖取自 Xu et al., 2006；照片取自 Xu et al., 2008)

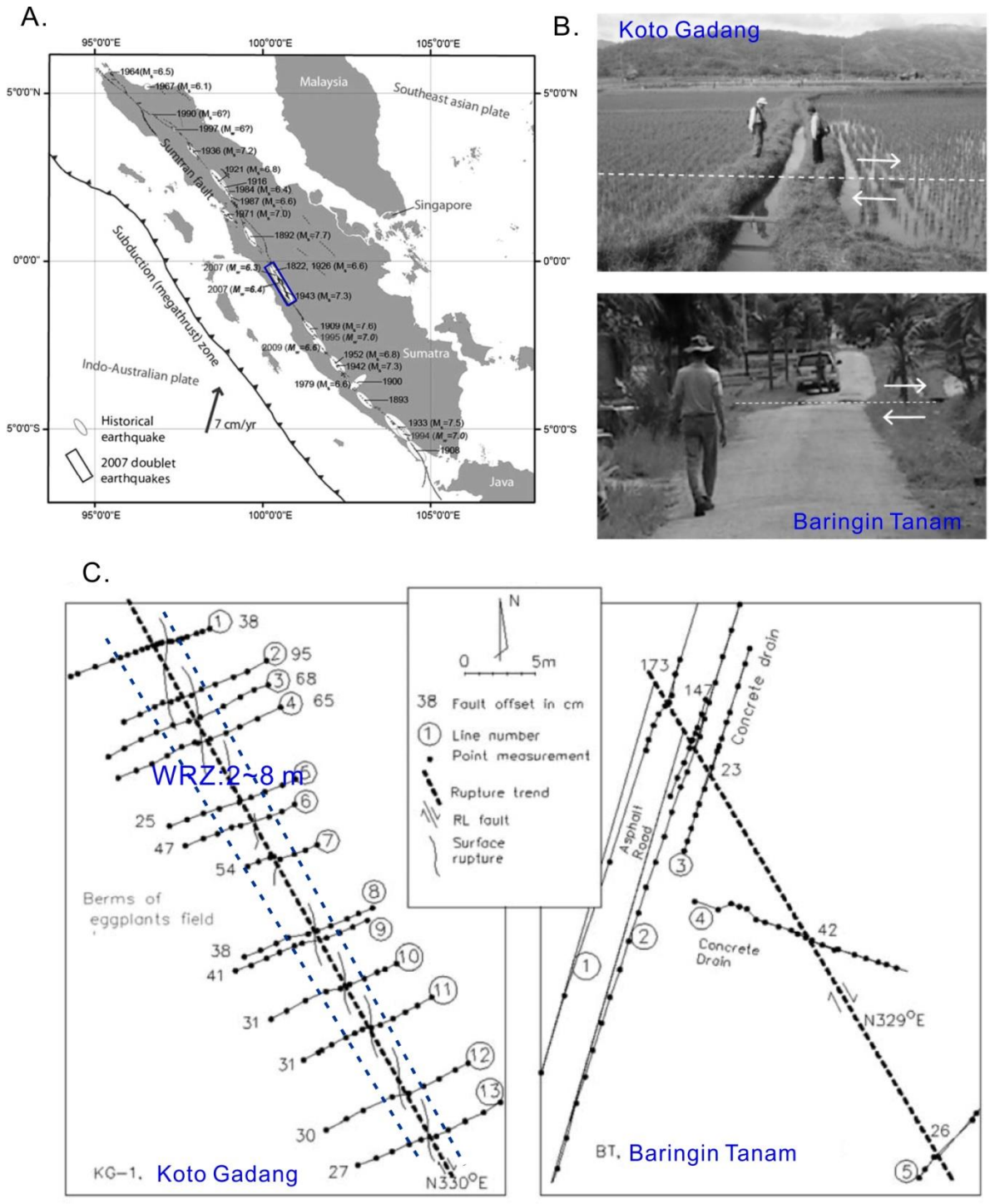


圖 2.1.10 2007 年 3 月 6 日印尼蘇門答臘島的兩起地震(M>6)之地表破裂。

WRZ 為地表破裂帶寬。(圖取自 Daryono et al., 2012)

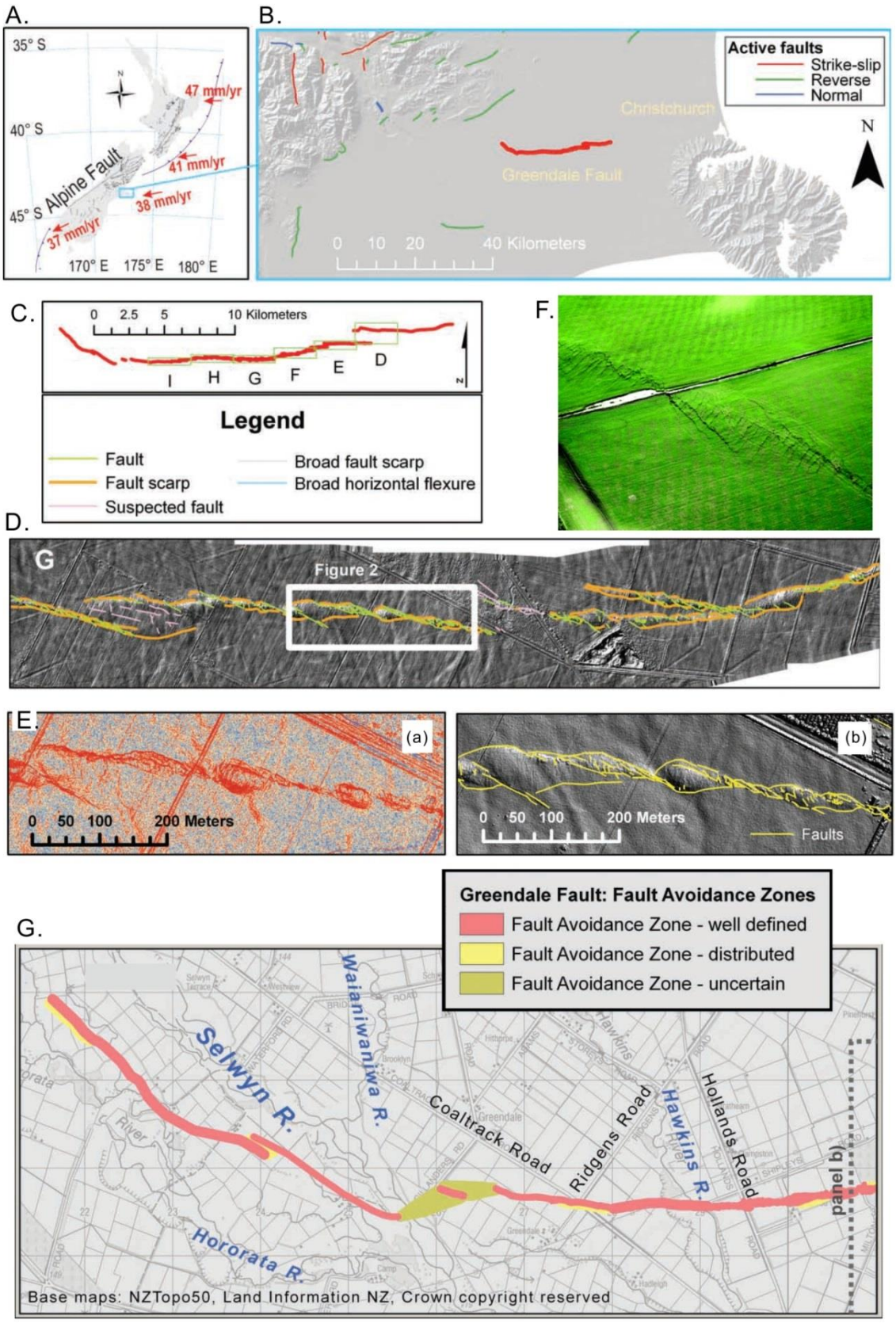


圖 2.1.11 2010 年 9 月 4 日紐西蘭南島的 Greendale 地震之地表破裂。(圖取自 Villamor et al., 2012)

2.2 國內外斷層帶退縮距離法規及安全性探討指標

2.2.1 美國加州

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

活動斷層帶退縮規定(fault setback requirements)，比較表如表 2.2.1，其要點如下：(1)確信斷層線兩旁各 15 公尺禁止建立建築。確信斷層線為有地形、與地質之活動證據顯示及由地下地質調查所確定者。(2)確信斷層線兩旁從 15 公尺至 38 公尺間之條帶內只能建立獨戶、單層木屋或相似之防震結構物。(3)推論斷層線兩旁各 30 公尺禁止建立建築。推論斷層為只有少數幾點之活動證據顯示及粗略之地下地質調查。(4)推論斷層線兩旁從 30 公尺至 53 公尺間之條帶內只能建立獨戶、單獨木屋或相似之防震結構物。(節錄自孫思優，1999)

2.2.2 日本

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

2.2.3 中國

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

2.2.4 臺灣

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

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

2003)。其管制原則如下：

1.公有建築物禁止興建，若現有公有建築經補強安全無慮後，仍可繼續使用。2.私有建築物高度不超過兩層樓，簷高不超過 7 公尺，得特許興建，並限作為自用農舍或住宅使用。3.其他活動斷層帶未明確的地區，經詳細地質調查過後確定其斷層經過明確位置，得比照活動斷層帶明確地區之禁建範圍。

唯斷層引致地表破裂並非單一線形，且各國斷層類型、活動型態、上覆土層特性等皆不相同，亦會影響地表變形，進而對地表建物或地下維生管線造成影響，故各國法令應考慮其立法目的及著重於開發前之調查工作。

表2.2.1 美國、日本、中國大陸及台灣活動斷層帶管制比較表(改自盛仲達，2008)

	美國	日本	中國大陸	台灣
活動斷層帶建築物之管制或方法	1971.Sam Fermamdo 地震 1972 年制定「阿奎斯特一布里奧洛特別調查區段法案(Alguist-priolo Erthquake Fault zoning.ACT)經十次修正 1994 改稱「阿奎斯特一布里奧洛地震斷層區段劃定法安案」(即加州地震斷層法)	災害對策基本法 災害救助法 建築基準法 大規模地震對策特別措置法 促進建築物耐震修改法律、受災市街地復興特別措置法建築法(第八十四條政府得於災區發佈禁限建令	1.對於斷層兩旁建築物尚無管制， 2.依地質構造，地震歷史。地層穩定性如地震時發生山崩、沈陷、地裂、土壤液化等以都市計畫使用分區手段劃入非建築使用區	1.開發管制：山開辦法第五條第一款坡度陡峭者。第二款地質結構不良，地層破碎、活動斷層或順向坡有滑動之虞者不得開發。 2.禁建：分暫時性禁建及永久性禁建。「禁建」不得建築之意，「限建」為可建築，但規定其限制建築之規模、大小、或高度等、「暫時性禁建」，表示在一段時日內實施禁建「永久性禁建」即表示永久性實施禁建。 3.九二一大地震後，內政部 88.11.8 台八八內營字第八八七七八五四號函送車籠埔斷層線兩側各 50M 範圍實施暫時禁建，至 88.12.31 止。 4.88.12.31 行政院災後重建委員會公布「近車籠埔斷層地區永久禁限建計畫」規定該斷層兩側各十五公尺都市計畫內土地為禁限建範圍、不明確地區的西側(下盤)三十公尺、東側(上盤)五十公尺範圍為永久禁限建地區。

表 2.2.1(續)美國、日本、中國大陸及台灣活動斷層帶管制比較表(改自盛仲達，2008)

	美國	日本	中國大陸	台灣
立法目的	(1)阻止在活動斷層上建造房屋防止錯動造成災害，但未包括土壤液化、山崩、土石流， (2)改進現有建築物耐震能力 (3)管制斷層兩側 200m 以內開發案 (4)一九八九年洛馬普利塔地震(Loma Prieta. Earthquake)復制定地震危害區劃分法案將土壤液化、山崩、土石流加以規範。	日本針對活動斷層禁限建僅針對重大公共工程，如核電廠、新幹線等，一般建物雖於建築法(84 條)明訂，但很少使用。	大陸對於地震斷層引起災害預防以都市及重大公共工程為重心，規定必須距斷層五公里	1.斷層帶管制之目的在運用環境風險管理策略以降低地震災害之損失，即是利用地質及都市計畫手段，將地震可能導致損失降低。 2.提高建築物之耐震能力：修改建築技術規則將台灣劃分為一甲區(特別強震區，如花蓮、嘉義、白河、古坑等)、地震一乙區(強震區，如東勢、石岡、豐原)、地震二區(中震區，台中市、新社、太平、大里、草屯、竹山、集集、埔里等)及地震三區(弱震區)，並將地震力計算增加垂直地震加土壤液化及動力分析。
開發前調查工作	加州政府礦務暨地質委員會於一九九四年頒佈「評鑑地表斷層錯動危險性準則;規定地震斷層之劃定公佈分兩階段。第一階段由州地質師發佈「初步評審地圖」供民眾公開閱覽九十天，經評審，修正繪製「正式地圖」分送州及縣市政府。	僅對重大公共工程、核能電廠、學校限制。	注重開發前地震危險分析災害分析	1.開發前調查項目主要為(1)物化環境(2)生態環境(3)景觀美質(4)社經環境 2.斷層帶盜線之評估為錯動位移、形態、位態長寬、斷層上下盤之材料性質、斷層上方覆土層厚度及類別、性質、斷層長度、活動週期、歷史上最大地震之破壞情形統計調查

表 2.2.1(續)美國、日本、中國大陸及台灣活動斷層帶管制比較表(改自盛仲達，2008)

	美國			日本	中國大陸	台灣
地震法規對活動斷層兩旁建築物之管制。	斷層位置	規定範圍	限制內容	一九九五年阪神大地震後在三浦半島的北武島斷層經調查確定位置後，限定兩側25公尺內不建築。	1.藉土地利用規劃達到禁限建之目的，在高烈震區之大都市從地質、地形、地貌、地質構造、土層在地震時之穩定性條件擬定細部計畫。 2.地震區中地形坡度250以上劃為綠化地區，100~250土地補強後作有限度使用。 3.穿越都市或在附近之斷層，根據斷層帶寬度、活動性、深度、決定距斷層之距離。	建築技術規則第十三章山坡地專章第262條第三款活動斷層：依歷史上最大地震規模(M)劃定在下表範圍者： 歷史地震規模： 1. m≧7 2. 7>m≧6 3.m≦6或無記錄者 不得開發範圍： 1.斷層帶二外側邊各100M 2.斷層帶二外側邊各50M 3.斷層帶二外側邊各30M
	確信斷層線	兩旁各15公尺以內	禁止興建住屋			
	推論斷層線	自15至38公尺間之條帶	僅可興建獨戶、單層木屋或相似之防震結構物			
		兩旁各30公尺以內	禁止興建住屋			
		兩旁自30至53公尺間之條帶內	僅可興建獨戶、單層木屋或相似之防震結構物			

2.3 斷層影響範圍因子之力學性質分析及簡化剖面

2.3.1 車籠埔斷層

(1) 竹山槽溝之簡化剖面

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

增或更新所蒐集資料庫內之資料及分析工程參數。圖 2.3.1 所示為車籠埔斷層竹山槽溝及附近工程鑽孔之相對位置圖。

如上所述，竹山博物館預定地除了槽溝資訊之外，尚有鑽井兩處，以及工程鑽孔共 8 孔靠近槽溝。其中二處鑽井編號分別為竹山一號及二號井，竹山一號井位於車籠埔斷層下盤，竹山二號井位於上盤。經檢視鑽井報告及岩心狀況，將上盤及下盤鑽井之土壤狀況整理如表 2.3.1。

另外由竹山博物館預定地內竹山槽溝附近工程鑽孔資料亦可以推估臨近土層狀況，其中上盤部分鑽孔為 A-1，其餘鑽孔(A-2~A-8)均位於下盤處，上下盤鑽孔高程變化約為 EL+148.7 公尺(上盤)至 EL+146.7 公尺~EL+145.3 公尺(下盤)。上盤鑽探報告指出由地表至地表下 2.7 公尺處為棕黃色，軟弱至中等強度砂質粉(黏)土，偶夾礫石，一般物性方面，此層之自然含水量變動範圍頗大，由 5%~7%(大部分為砂土)至 17%~28%(大部分為黏土或粉土)，現地密度為 1.94 至 2.09g/cm^3，力學試驗結果方面，進行直剪試驗得其摩擦角約為 26~28 度，凝聚力約為 20kPa；另外無圍壓縮試驗結果指出其單壓強度約為 50~82kPa。於現地進行之標準貫入試驗(SPT)得到之標準貫入試驗值為 6-17 次，屬中等強度之土層。上盤部分由地表下 2.7 公尺至地表下 25 公尺處為灰黑色礫石層，此一土層狀況與上盤之竹山二號鑽井大致相符，由於本層大多屬礫石層，標準貫入試驗值均大於 100 次，亦無適合土樣以進行一般物性或力學性質等試驗。

下盤部分共有 7 個工程鑽孔，其中 A2~A4 靠近槽溝之南牆，A5~A8 介於北牆與南牆之間，A5 為最靠近北牆之工程鑽孔。下盤鑽探報告指出由地表至地表下 7 公尺處為棕黃色軟弱至中等強度砂質粉(黏)土，偶夾礫石。一般物性方面，其自然含水量為 19%~26%，塑性指數(Plasticity Index, PI)為無塑性至 14，力學試驗結果方面，進行直剪試驗得其摩擦角為 27 度，凝聚力約為 15~19kPa；另外無圍壓縮試驗結果指出其單壓強度約為 28~75kPa。於現地進行之標準貫入試驗值為 6~11，屬軟弱至中等強度土層。上盤部分由地表下 7 公尺至 25 公尺處為灰黑色礫石層，偶夾粗中細砂及薄層黏土，由於本層亦大多屬礫石層，標準

貫入試驗值均大於 100 次，無適合土樣以進行相關試驗。

進行數值分析除了需將土層分層簡化之外，尚需土壤工程參數及組成律模式等，才足以進行相關分析及討論。至目前為止，竹山博物館預定地由於先前已因工程需要而進行一系列土壤一般物性及力學實驗，因此，數值分析所需之土壤參數可由相關實驗推估而得。一般描述土壤力學行為所需參數為土壤之凝聚力(cohesion，c)、摩擦角(friction angle，ϕ)、土壤單位重(unit weight，γ)、彈性模數(elastic modulus，E)與波松比(Poisson's ratio，ν)等。由於竹山博物館預定地內工程鑽孔取得之樣本大多為淺層土壤(粉土或黏土一類)，進行之一般物性及力學試驗僅限於取得樣本之部分，因此，淺層土壤之參數估計乃基於相關之試驗結果，而較深層偏礫石層之部分，因缺乏樣本及室內實驗結果，其土壤參數僅參照卵礫石層相關文獻以及現地之標準貫入試驗值(SPT-N)估計而得。

此外，描述土壤變形性之參數部分(E，ν)，可由無圍壓縮試驗之應力應變曲線推估而得。竹山斷層博物館工程所進行之工程鑽孔部分，其中鑽孔 A2 及 A3 分別於地表下 2.9 公尺及 3.5 公尺處，進行無圍壓縮試驗整理而得之應力應變曲線如圖 2.3.2 所示，其中位於地表下 2.9 公尺及 3.5 公尺處之試體，推估切線彈性模數分別為 1480kPa 與 640kPa。

若由鑽孔 A7 及 A12 分別位於地表下 4.35 公尺及 1.85 公尺處之土壤樣本進行之三軸壓密不排水壓縮試驗結果推估，其樣本分別在不同圍壓下，其軸差應力及應變之關係如圖 2.3.3 所示，割線模數整理如表 2.3.2 所示。

上述實驗結果指出，淺層土層(地表下 2.5 公尺左右)之割線模數約為 3500 ~ 6000kPa，若淺層土層(粉質黏土)受到相當於地表下 5 公尺處之圍壓，則割線模數約為 14000~16000kPa，以及相同粉質黏性土壤在地表下 10 公尺處之割線模數約為 32000~35000kPa。其次，現地之標準貫入試驗指出竹山槽溝淺層土壤附近之標準貫入試驗值 SPT-N 變化範圍約在 6 到 17 次，由 Ohya(1982)等人建議之經驗式及圖 2.3.4，亦可推估其對應之彈性模數之變動範圍在 5960-11500kPa，與上述三軸力學試驗所推估之結果相近。

由上述討論可以得知，竹山槽溝附近之土層可簡化為兩層，建議之土壤力學參數及彈性參數如表 2.3.3 所示。

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

表 2.3.1 車籠埔斷層位於竹山槽溝附近地層分佈

鑽井位置	深度(m)	地層描述
上盤鑽井 (竹山二號井)	0 ~ 2.7	黃棕色粉(黏)土及細砂層
	2.7 ~ 15.8	灰黑色礫石層
	15.8 ~ 54.3	灰色砂岩及粉砂岩
	54.3 ~ 60	礫石層夾層砂層
下盤鑽井 (竹山一號井)	0 ~ 8	黃棕色粉(黏)土及細砂層，偶夾有機質
	8 ~ 15.8	灰黑色礫石層
	15.8 ~ 19.4	黃棕色粉(黏)土及細砂層
	19.4 ~ 50	礫石層及粉(黏)土層互層

表 2.3.2 三軸壓密不排水壓縮試驗推估之割線模數

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

表 2.3.3 竹山槽溝附近鑽孔處簡化土層表

地層深度(m)	描述	飽和單位重 (kN/m^3)	SPT-N	C(kPa)	ϕ(度)	E(MPa)	ν
0 ~ 2	黃棕色軟弱至中等強度粉土及黏土	20	6-17	20	27	3.3-5.7	0.49
C 及ϕ以 PI 推估而得，E 以 SPT-N 推估而得							
2 ~ 25	灰黑色卵礫石層，偶夾細砂及粉土、黏土	22	>100	0	45	14-35	0.4
C 與ϕ取自三軸壓密不排水試驗數據							



圖 2.3.1 車籠埔斷層竹山博物館預定地附近鑽井及工程鑽孔位置圖

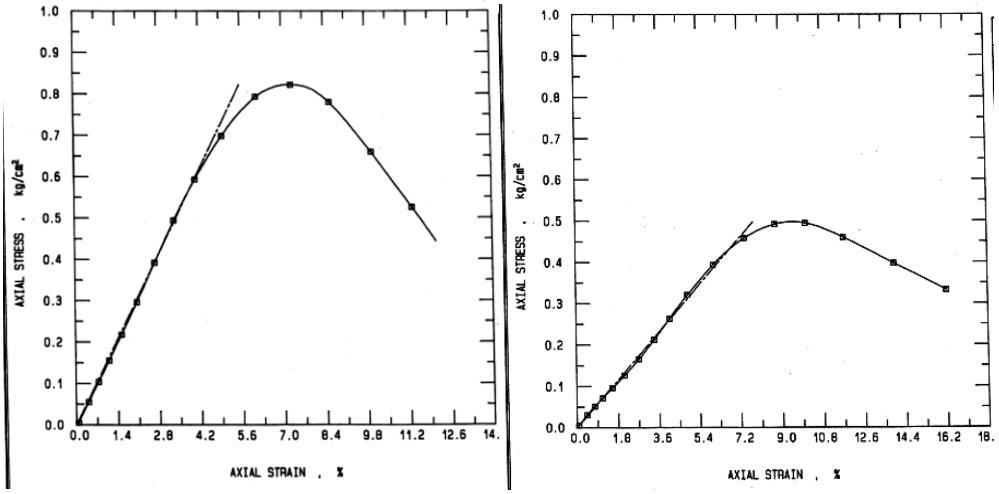


圖 2.3.2 竹山博物館工程鑽孔 A2 及 A3 進行無圍壓縮試驗應力應變曲線

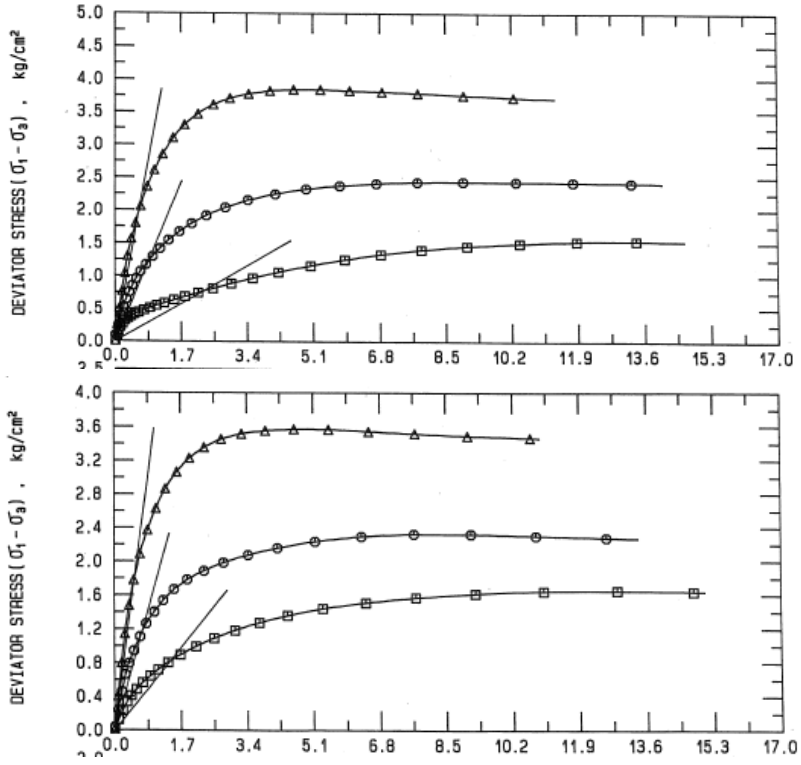


圖 2.3.3 三軸壓密不排水壓縮試驗應力應變曲線(竹山博物館工程鑽孔 A7(上圖)4.35 公尺及 A12(下圖)1.85 公尺)

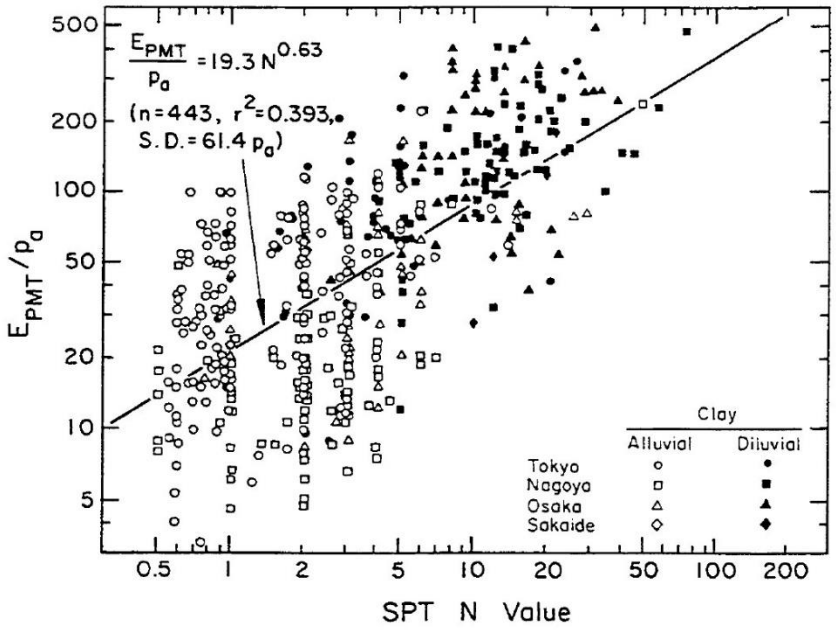


圖 2.3.4 以標準貫入試驗 N 值推估彈性模數(Ohya et al., 1982)

(2) 豐原中正公園之簡化剖面

由經濟部中央地質調查所委託相關廠商進行之工程地質鑽探工作，主要進行鑽探、實驗項目之工作以及鑽探實驗結果報告。鑽探位置由本計畫協助選定，並針對特定土壤或岩石樣本，建議相關之實驗項目以利計畫之進行。此次工程地質鑽探在車籠埔斷層的部分選定兩孔，位置分別如圖 2.3.5 所示，其中一孔位於台中市豐原中正公園內(簡稱北孔)，主要位於車籠埔斷層背衝斷層之上盤處，另一鑽孔位於豐原中正公園外西南側(簡稱南孔)，主要位於車籠埔斷層主線之上盤處，南孔位於北孔之西南側約 400 公尺處，另外此鑽探點距離先前使用其資料進行土層簡化之竹山槽溝約為 50 公里(直線距離)。

圖 2.3.6 所示為北孔之樣本置放於岩心箱情形(僅節錄地表至 12 公尺深處)，由岩心照片可以看出，淺層土壤在地表下 1 公尺內大多為黃棕色受到高度擾動且破碎之回填土，其下為灰色之卵礫石或礫石偶夾土壤(岩心箱資訊指出該深度之土壤已另行包裝以進行相關土壤力學實驗)。在深度 4.05 公尺到深度 4.5 公尺之間進行之標準貫入試驗得到其 N 值為 33 次，代表該深度土壤為中等緊密到

緊密土層。地表下 7 公尺深至 30 公尺處為砂頁岩互層並夾細砂，依此判斷岩層在北孔內之地表下 7 公尺左右即出現。由現地記錄之鑽探報告亦可以得知，北孔之斷層剪裂帶約位於地表下 17 公尺到 22 公尺之間。此外，鑽探報告亦顯示如同岩心之地層分佈，表層土壤至地表下約 8 公尺處為礫石層，地表下 8 公尺處至約 30 公尺處為砂頁岩互層，並夾雜少許黏土及粉土質，詳細資料請見表 2.3.4 所示，由於本工程鑽孔之土壤樣本不多，因此，針對僅有之岩石樣本及其層間夾泥之力學強度亦請參考表 2.3.4。

南孔部分，由圖 2.3.7 可以得知，地表下 4.05 公尺至 10 公尺處，為夾雜卵礫石之黃棕色粉黏土，偶夾砂，其中由標準貫入試驗 N 值可以得知，地表下 4.05 公尺到 4.5 公尺處之標準貫入試驗 N 值為 18，地表下 5.9 公尺到 6.35 公尺處之標準貫入試驗 N 值為 44，地表下 7.05 公尺到 7.5 公尺處之標準貫入試驗 N 值為 30，地表下 8.55 公尺到 9.0 公尺處之標準貫入試驗 N 值為 49，地表下 10.05 公尺到 10.5 公尺處之標準貫入試驗 N 值為 40，其強度有隨深度增加而變大之趨勢。而由地表下 12 公尺處至 18 公尺處，土層主要為卵礫石層夾雜黃棕色黏土或粉土及砂層，由於本層大多遭遇卵礫石等材料，因此進行標準貫入試驗所得到之 N 值皆大於 50。地表下 18 公尺處至 22 公尺處(其中 19.3 公尺處到 20 公尺處土樣樣本缺乏，無法判斷)，判斷為黏土層夾砂。地表下 22 公尺處到約 28.6 公尺處，主要為卵礫石材料，並夾雜大量黃棕色粉黏土或砂性土壤。此外，鑽探報告亦指出地表至 2.5 公尺處為人工回填土，地表下 2.5 公尺處為黏土質砂或砂礫質黏土交錯出現，詳細資料請見表 2.3.5 所示，針對此鑽孔取樣所得之土樣，亦進行相關力學試驗，其試驗資料列於表中備註欄。

而對照先前在竹山槽溝附近之鑽探以及挖溝資料而建議之簡化土壤分層可以得知，竹山槽構附近之地層情形與中正公園附近不盡相同。竹山槽溝附近，土層由地表至 2 公尺深處為黏土層，而地表下 2 公尺深處至 25 公尺深處為卵礫石夾雜細砂或粉土、黏土。就鑽探所得資訊而言，北孔土樣及岩心照片指出地表至地表下 7 公尺處為卵礫石夾雜細砂或粉土、黏土，地表下 7 公尺至 30 公尺

處為砂頁岩互層，由於北孔座落於河床旁之階地上，可以預期到該鑽孔之淺層土壤大部分應為卵礫石材料，下方岩層即開始出現，另外北孔位置並非座落在車籠埔斷層主要破裂帶，而是位於其東側且長度約為 200 公尺之次要破裂帶。南孔之土層部分，其淺層土壤由地表至約地表下 7 公尺處為夾雜卵礫石之黃棕色粉黏土，其下則大多為卵礫石材料，並偶夾黏土層及砂層。南孔之材料性質相較於竹山槽溝部分，由現有資料看來較為類似。綜合上述討論，建議中正公園內(北孔資料)之簡化土層為二層，其相關土層資訊其對應之一般物及力學性質，可參考表 2.3.6 建議之值，而中正公園西南側(南孔)之簡化土層以及對應之一般物性及力學性質，可參考表 2.3.7 之值。

表 2.3.4 車籠埔斷層位於中正公園附近地層分佈

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

表 2.3.5 車籠埔斷層位於中正公園西南側地層分佈

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

表 2.3.6 豐原中正公園鑽孔處簡化土層表

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

表 2.3.7 豐原中正公園西南側鑽孔處簡化土層表

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



圖 2.3.5 本計畫進行之車籠埔斷層主線(南孔)及分枝(北孔)鑽孔相對位置圖



圖 2.3.6 中正公園鑽孔(北孔)土壤(由保麗龍取代)及岩心照片(0~12 公尺處)



圖 2.3.7 豊原中正公園南側鑽孔(南孔土壌(由保麗龍取代)及岩心照片)

2.3.2 山腳斷層

由於山腳斷層分佈範圍較廣，因此僅先就目前蒐集到的資料進行分析與整理，主要來源為台北市仙渡超高壓變電所工程之大地工程鑽探資料，共分為二期，第一期為皇昌營造公司之資料，共 38 個鑽孔，第二期補充鑽探則由富國工程技術公司提供，共 9 個鑽孔。鑽探報告內同時亦提供常見之室內試驗資料，如一般物性等資料，以及相關力學試驗(如直剪試驗、三軸試驗、無圍壓縮試驗等)所得之強度參數，因此，本研究將使用上述資料協助簡化土壤分層以及參數之選定，另外，鑽探報告內亦提供標準貫入試驗值，因此，若與分析相關之力學參數無適合力學試驗結果可供參考，則將以經驗公式配合適當之判斷，決定所需使用之參數。仙渡超高壓變電所內部鑽孔位置如圖 2.3.8 所示，鑽孔所在位置皆位於山腳斷層下盤處，鑽孔距離山腳斷層線約 35 公尺至 230 公尺之間，鑽探深度大多位於地表下 43 公尺到 79 公尺之間。

經檢視鑽探資料，此處地層在淺層部分(地表到地表下 3 公尺處)大約為粉土質砂及部分回填土，地表下 3 公尺處到約地表下 50 公尺處大多為黏土層，含粉土質細砂，地表下 50 公尺處到地表下 80 公尺處為黏土層與砂土層，開始有岩塊碎屑出現，地表下 80 公尺以下為岩盤，詳細地層分佈狀況見表 2.3.8 所示。

根據鑽探以及試驗資料判斷，此處地層一般物性分佈隨高程變化如圖 2.3.9(a)~(h)所示。其中由細粒料含量 (小於 200 號篩之顆粒重量比例)圖可以明顯看出，由地表到地表下約 10 公尺深處，其細粒料含量分佈較廣，但大多屬於小於 50%之含量，屬砂性土壤偶夾粉土或黏土層，另外，由孔隙比(0.5 到 1)或是標準貫入試驗值之變化(4 到 15 左右)亦可看出地層構造屬於相對疏鬆至中等緊密之分佈；由於砂性土壤吸附水之能力較黏土差，因此，由含水量的變化亦可以看出從地表至地表下 10 公尺處之土壤性質與其下方之土層性質差異頗大。由於此層土壤較偏向砂性土壤，因此其塑性指數較難以定義，若局部土壤含有較多之細粒料土壤，則其塑性指數較能以實驗求得，如圖 2.3.9(g)所示。其次，總單位重或是乾單位重之變化較難以從地層之變化看出之差異，但是地表到地

表下 10 公尺之土壤單位重分佈範圍與其他層土層亦有約略不同之分佈情形。

再者，地表下 10 公尺到約 40 公尺處，由細粒料含量可以明顯看出此層之細粒料含量接近 100%，說明此處地層大部分為含粉土或黏土質之土壤，再對照鑽探報告亦可以看出，此一粉土或黏土層夾雜少量砂土，由標準貫入試驗值可以看出其隨深度增加之趨勢，淺層部分之標準貫入試驗值指出較為軟弱之構造，而隨著深度增加，其強度隨之上升，另外，塑性指數位於 12 到 22 之間，大多屬低塑性黏土(CL)，其餘一般物性參數可參照圖 2.3.9(a)~(h)。另外，針對地表下 40 公尺以下之地層，若檢視標準貫入試驗值隨深度之變化，則可以看出其值會隨深度而增加，但是在地表下 50 公尺處附近以下，其標準貫入試驗值變化則較為複雜，其次，由資料中亦無法看出岩盤所在位置，因此，經檢視該基地之補充鑽探資料之標準貫入試驗值可以得知，該處岩盤約略位於地表下 80 公尺處，因此，地表下 40 公尺到 80 公尺處為粉土及黏土質土層，夾雜較多(相較於上層)之砂土及岩屑，且與上層土層比較，其含水量有降低之趨勢，地表下 80 公尺以下經檢視鑽探報告及標準貫入試驗值可以得知，此處地層偏向火山角礫岩，與上層土層有明顯差異，如圖 2.3.9(h)所示。

基於上述之討論以及各土層之物理及力學性質分佈圖，建議山腳斷層於仙渡超高壓變電所附近土層簡化如表 2.3.9 所示。

由於此處鑽探資料相對於其他斷層(車籠埔及米崙斷層)較多，因此除了利用鑽探資料進行土層分層之簡化外，尚可以利用鑽探資料計算各物理量之平均值及標準差，亦可利用統計方法找出符合其資料變異性之分佈，分別對於上述建議之簡化第一層以及第二層進行探討，其中由於簡化第一層主要為砂性土壤，因此其塑性指數試驗資料較少，改以直方圖表示各塑性指數範圍中之次數，同樣道理，由於簡化第二層大多為黏土或粉土層，因此其細粒料含量較為一致，亦以直方圖方式表示。

就簡化第一層而言，分別就其孔隙比，細粒料含量、含水量、土壤乾單位重、總單位重、標準貫入試驗值之變化繪製其發生頻率與分佈範圍關係圖，由

圖 2.3.10(a)~(g)可以看出，其分佈大多屬於對數常態分佈或是常態分佈，而由於對數常態分佈較能反應其眾數(mode)之數值，因此，對於本研究所使用之參數而言，若需考量其變化情形，則建議使用對數常態分佈來描述其分佈情形。

此外，對於簡化第一層土壤而言，標準貫入試驗值亦用來推估其對應之可能摩擦角及彈性模數，如同前述，砂土層之摩擦角(ϕ)與彈性模數(E)可利用第二章之經驗公式

$$\tan\phi \approx \left[\frac{N}{(12.2+20.3\frac{\sigma_{v0}'}{p_a})}\right]^{0.34} \quad \text{式 2.3.1}$$

$$E = 920(N)^{0.66}\ (\text{kPa}) \quad \text{式 2.3.2}$$

推估其值，其中 σ_{v0}'為垂直有效應力，N 為對應之標準試驗貫入值，經計算分析後，亦可繪製其分佈圖如圖 2.3.11(a)、(b)所示：

由圖 2.3.11 (a)可以看出，摩擦角之分佈在 35 度附近之發生頻率較高，若以對數常態分佈或常態分佈來描述，則其眾數對應之摩擦角約位於 33 度附近，與實際資料較為不符，但若考量其整體分佈情形，則可以看出此兩種分佈函數均能完整地描述其分佈範圍位於 23 度至 40 度之間，因此，就往後分析所需，將使用對數常態分佈來考慮其參數之變異性。其次，就彈性模數的分佈情形來說(圖 2.3.11(b))，對數常態分佈與常態分佈均能描述其眾數發生值以及變化範圍，因此，就分析而言，亦考慮使用對數常態分佈來描述其變化情形。就簡化第一層而言，建議之土壤參數(如表 2.3.9 所示)，包括摩擦角及彈性模數等，均是依照其於對數常態分佈下之平均值而得。

對於簡化土層第二層而言，本研究亦就其孔隙比、塑性指數、含水量、土壤總單位重、乾單位重、標準貫入試驗值等進行統計分析以了解其分佈情形，如圖 2.3.12(a)~(g)所示。如同簡化土層第一層之分佈情形，此地層之土壤一般物性參數亦得以用對數常態分佈得到不錯之模擬分佈，但塑性指數之實際分佈

資料若以對數常態或常態分佈模擬則有較大之不同，由於塑性指數在簡化第二層主要用於推估其不排水剪力強度之分佈情形，因此，此一物性之分佈在分析上較不考慮使用，對於本研究之分析影響較小，後續將再利用其他分佈來擬合出較能描述塑性指數分佈之函數。如同簡化土層第一層，模型分析所需使用之力學參數亦需仰賴經驗公式以及實驗資料推估而得，而由於簡化土層第二層主要為黏土或粉土層，因此，模型分析上需要輸入其不排水剪力強度以及彈性模數等參數，並在考慮其變化情形下模型分析結果之變動範圍，才能完整討論土層力學參數變化下，對於近地表變形之影響。

如同前第二章所述，推估土壤之不排水剪力強度(S_u)以及彈性模數(E)可利用其與塑性指數、有效應力或是標準貫入試驗 N 值之經驗公式來計算，相關公式如式 1 及式 3 所示，式中 S_u 之單位與使用於同一經驗公式內之 σ_p'相同，σ_p'為土壤之預壓密應力，由於此一地層土壤位於地表下 10 公尺處以下，照經驗判斷較屬於正常壓密黏土，因此，此 σ_p'亦可使用垂直有效應力代替，另外，N 為標準貫入試驗值。

若以現有資料搭配上述之經驗公式，則所求得之不排水剪力強度以及其彈性模數之分佈可以圖 2.3.13 表示：由圖 2.3.13(a)可以看出，推估不排水剪力強度之分佈較偏向常態分佈函數，而彈性模數之分佈(圖 2.3.13(b))不論以對數常態或是常態分佈函數，均無法有效地描述實際資料中某些資料點缺乏之事實，此一現象之可能原因在於簡化土層第二層之標準貫入試驗值之資料點數較少所致，因此，就此一地層之彈性模數分佈狀況來說，亦建議使用對數常態分佈來描述其變化情形。

綜合上述，對於山腳斷層靠近台北市仙渡超高壓變電所之簡化地層各項物性及力學參數分佈情形，在此以表 2.3.10 做一綜合整理，須注意的是，此處所討論之資料乃由山腳斷層沿線局部區域之鑽探資料整理而得，若有其他區域有模擬分析之需要，本研究亦需先取得當地資料，並利用此節所使用之方法進行探討，才能使用相對應之資料進行分析。

表 2.3.8 山腳斷層沿線仙渡超高壓變電所基地地層分佈表

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

表 2.3.9 山腳斷層於仙渡超高壓變電所附近地層簡化表

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

表 2.3.10 土壤一般物性及力學性質之分佈特性

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

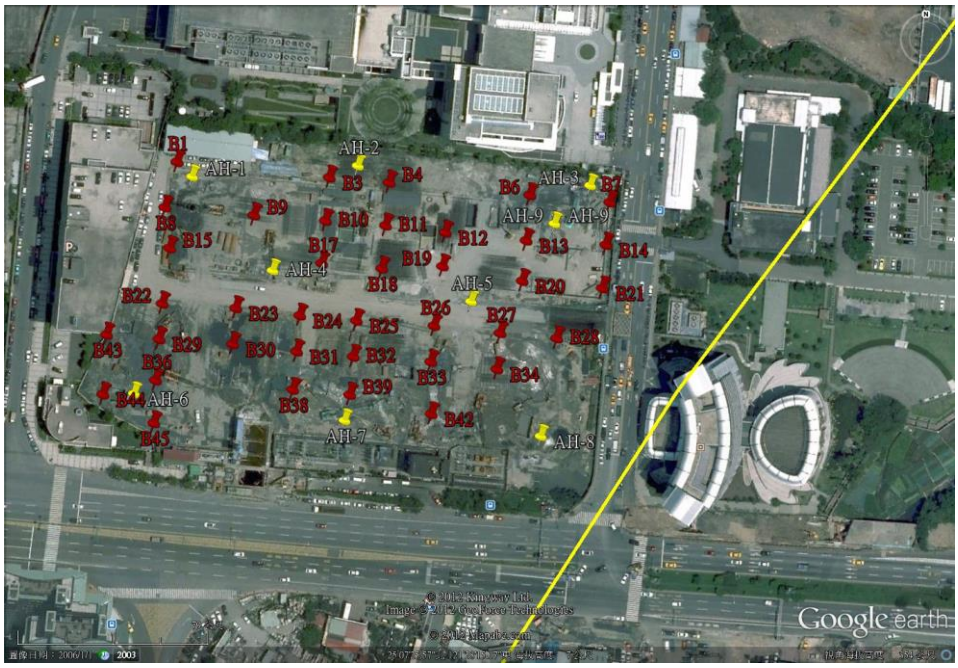
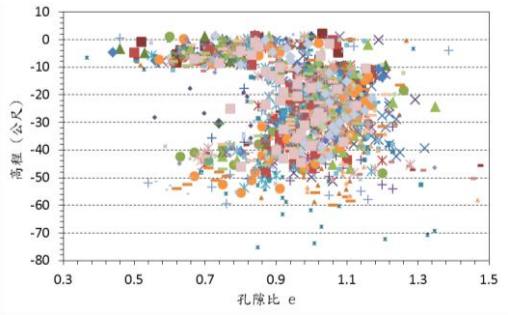
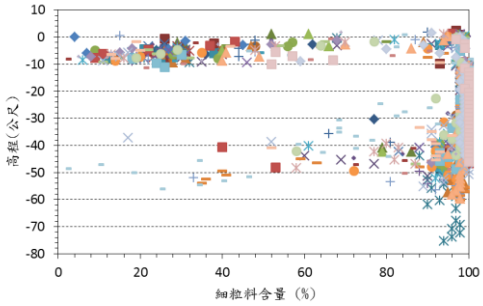


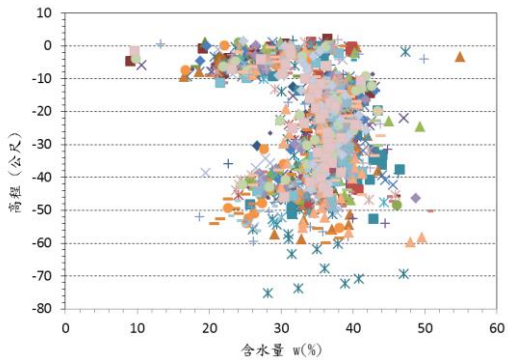
圖 2.3.8 山腳斷層沿線仙渡超高壓變電所基地鑽探位置圖(直線段為山腳斷層線)



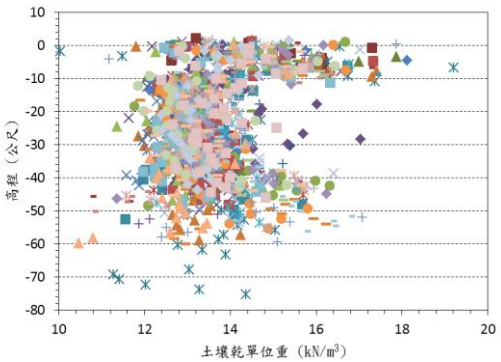
(a) 孔隙比與高程關係圖



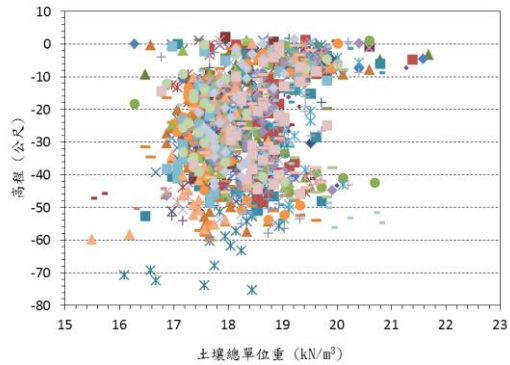
(b) 細粒料含量與高程關係圖



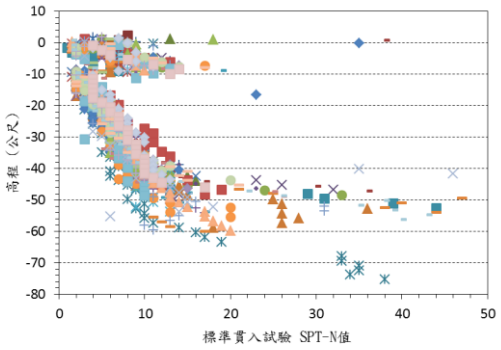
(c) 含水量與高程關係圖



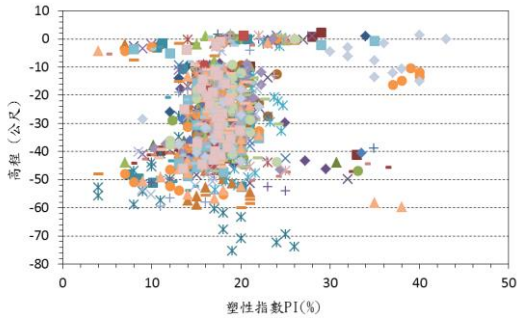
(d) 土壤乾單位重與高程關係圖



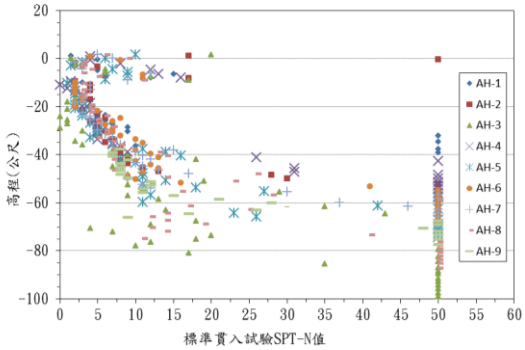
(e) 土壤總單位重與高程關係圖



(f) 標準貫入試驗值與高程關係圖

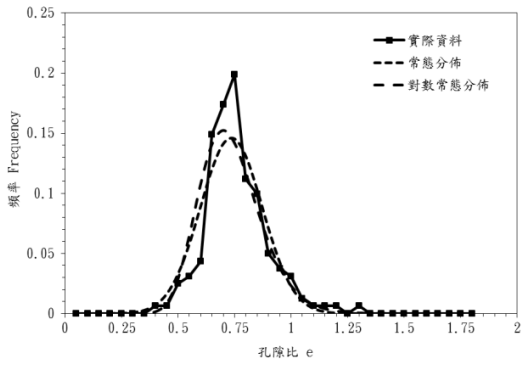


(g) 塑性指數與高程關係圖

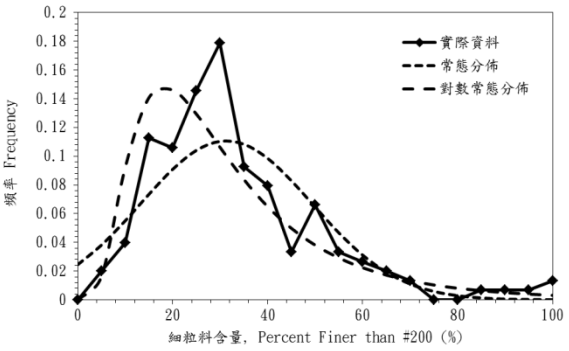


(h) 標準貫入試驗值與高程關係圖(補充鑽探)

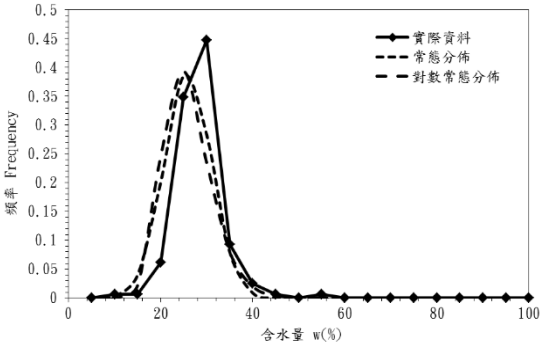
圖 2.3.9 山腳斷層於仙渡超高壓變電所附近土層物理性質及力學性質隨高程變化圖



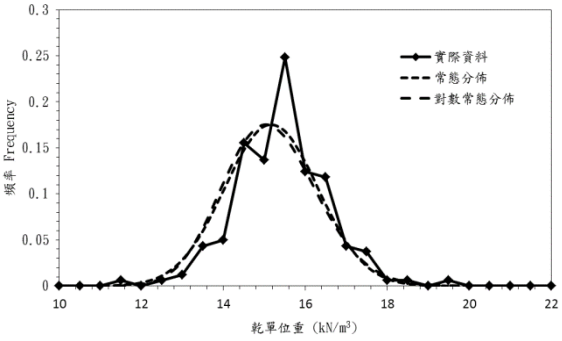
(a) 孔隙比分佈圖



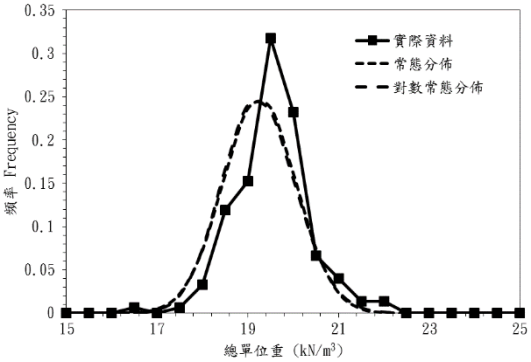
(b) 細粒料含量分佈圖



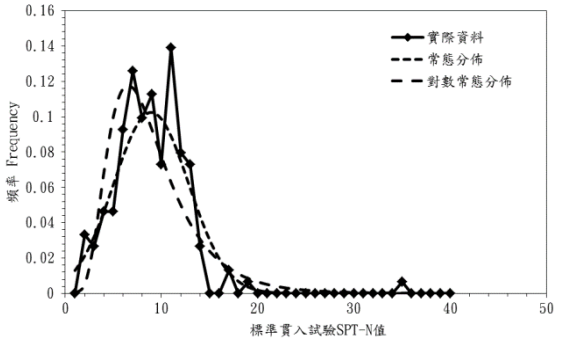
(c) 含水量分佈圖



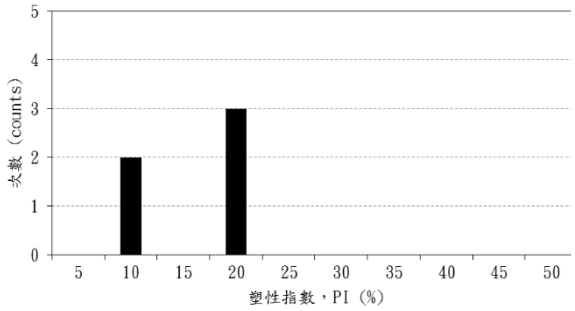
(d) 土壤乾單位重分佈圖



(e) 土壤總單位重分佈圖

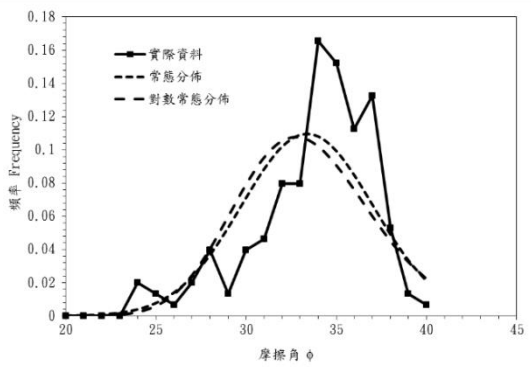


(f) 標準貫入試驗值分佈圖

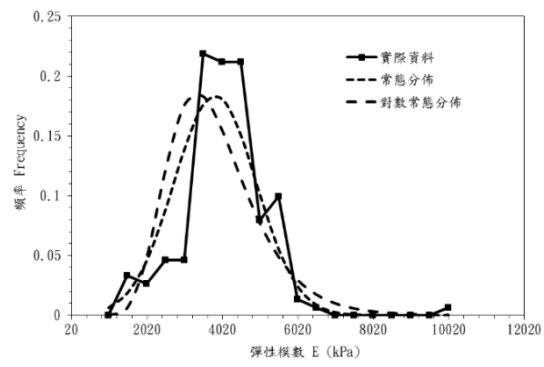


(g) 塑性指數分佈直方圖

圖 2.3.10 山腳斷層於仙渡超高壓變電所附近土層簡化土層第一層之物理性質及力學性質分佈圖

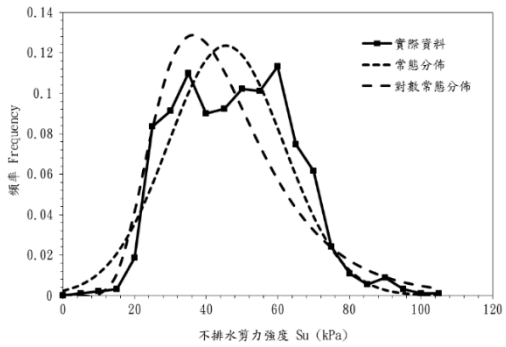


(a) 推估摩擦角之分佈圖

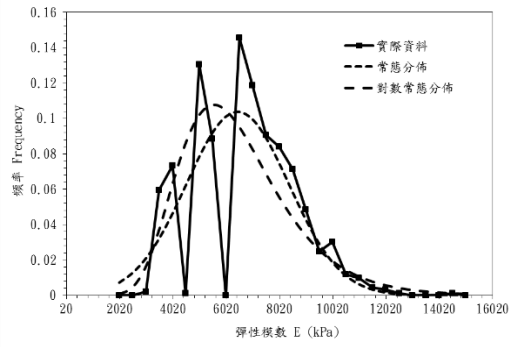


(b) 推估彈性模數之分佈圖

圖 2.3.11 山腳斷層於仙渡超高壓變電所附近土層簡化土層第一層推估力學參數分佈圖

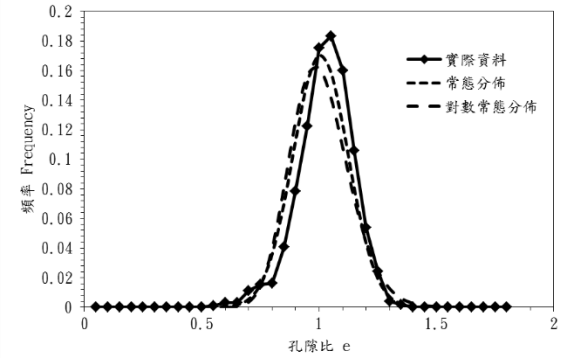


(a) 推估不排水剪力強度之分佈圖

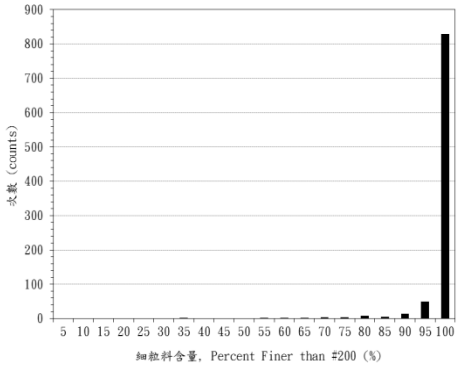


(b) 推估彈性模數之分佈圖

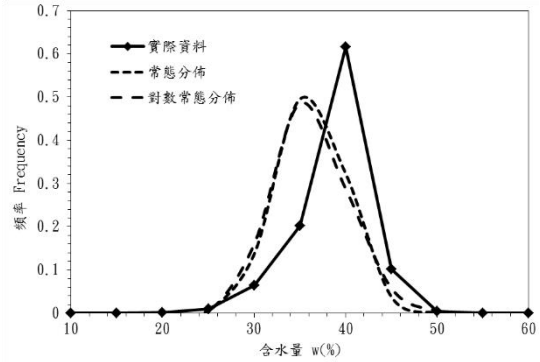
圖 2.3.12 山腳斷層於仙渡超高壓變電所附近土層簡化土層第二層推估力學參數分佈圖



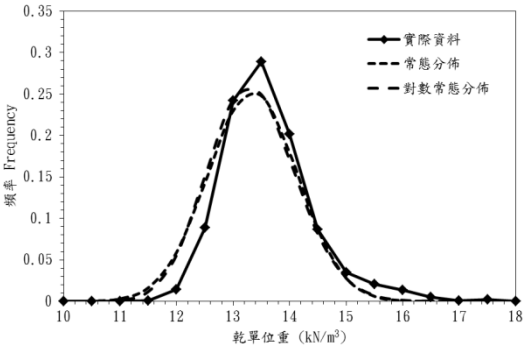
(a) 孔隙比分佈圖



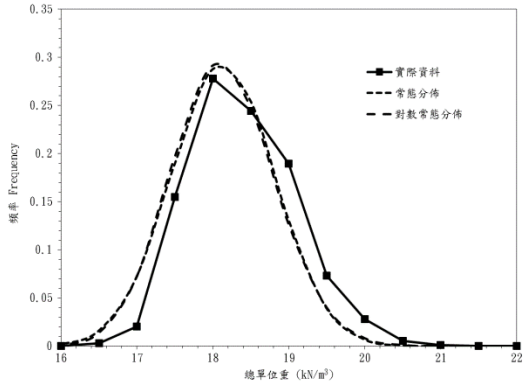
(b) 細粒料含量直方圖



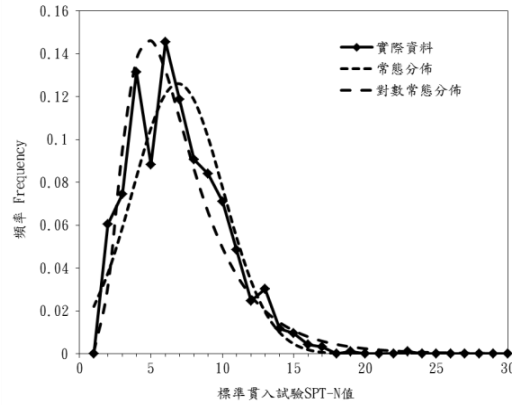
(c) 含水量分佈圖



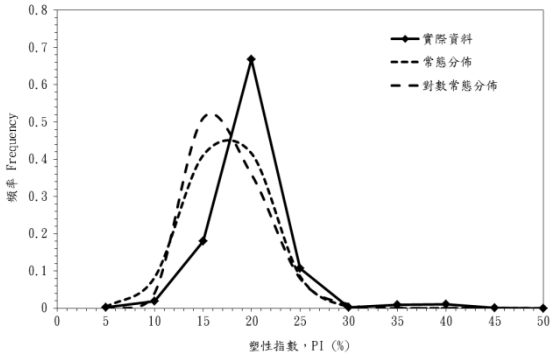
(d) 土壤乾單位重分佈圖



(e) 土壤總單位重分佈圖



(f) 標準貫入試驗值分佈圖



(g) 塑性指數分佈圖

圖 2.3.13 山腳斷層於仙渡超高壓變電所附近土層簡化土層第二層之物理性質及力學性質分佈圖

2.3.3 米崙斷層

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 2.3.14 所示，其詳細位置如表 2.3.11 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 2.3.15 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(V_p)與 S 波波速(V_s)隨深度之變化，因此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：

$$V_p / V_s = \sqrt{2(1-\mu)/(1-2\mu)} \qquad \text{式 3.3.1}$$

$$V_s = \sqrt{G/\rho} = \sqrt{E/2(1+\mu)\rho} \qquad \text{式 3.3.2}$$

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 2.0 g/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 2.3.16、圖 2.3.17 所示。

由圖 2.3.16 左圖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，而圖 2.3.16 右圖之波松比尚屬合理之範圍。對照上述之偏高之彈性模數解，本研究亦利用先前所使用的經驗公式，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 2.3.17 所示。

此外，如鑽孔與斷層相對位置分佈圖亦可以得知，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 2.3.12 所示，第二區所在位置位於花蓮市北邊，主要由 HWA28 鑽孔判斷而得，如表 2.3.13 所示。

表 2.3.11 臨近米崙斷層鑽孔基本資料表

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 2.3.12 米崙斷層南段之簡化土層建議表

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 2.3.13 米崙斷層北段之簡化土層建議表(主要由 HWA028 推估而得)

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

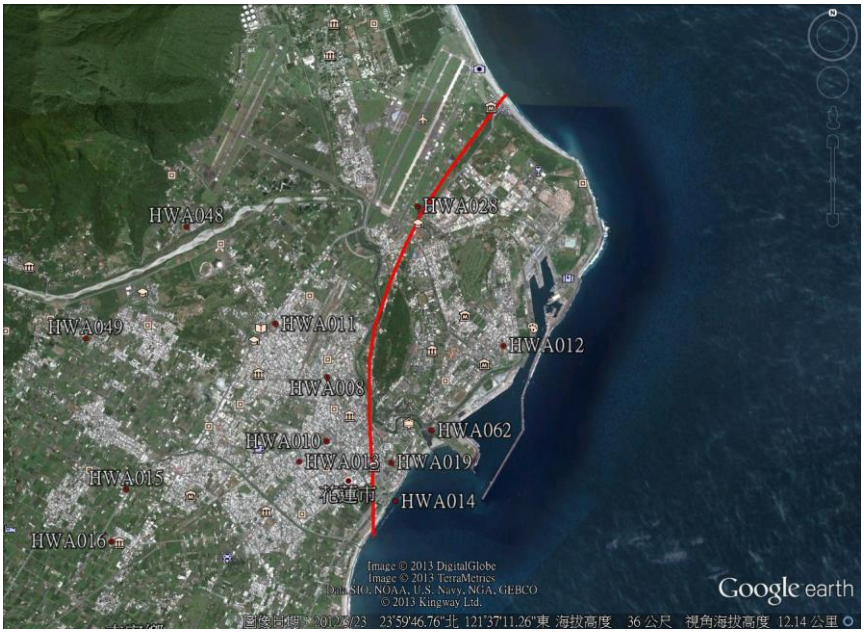


圖 2.3.14 米崙斷層與臨近工程鑽孔分佈圖

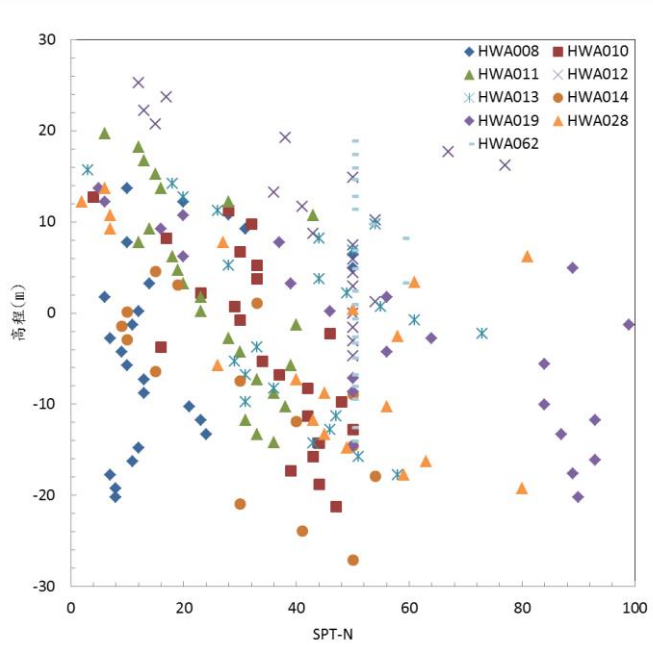


圖 2.3.15 臨近米崙斷層工程鑽孔之標準貫入試驗值與高程關係圖

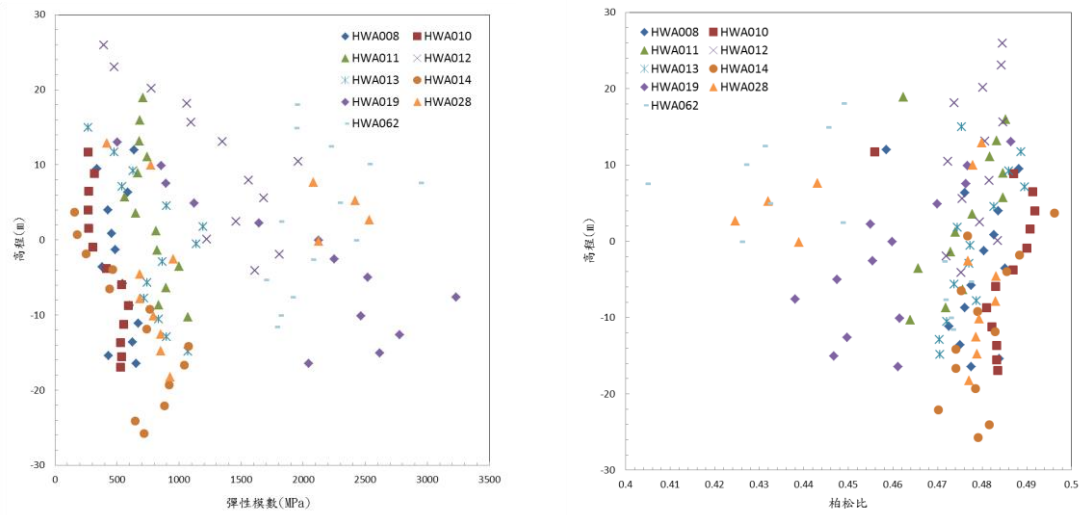


圖 2.3.16 臨近米崙斷層土層之彈性模數(左圖)、波松比(右圖)與高程關係圖

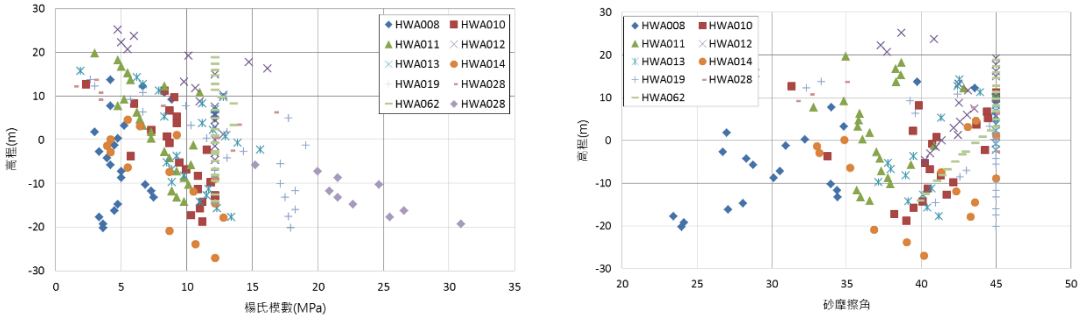


圖 2.3.17 臨近米崙斷層土層之楊氏模數(左)、摩擦角(右)與高程關係圖

2.4 竹山槽溝現地調查

2012 年竹山槽溝原址重挖，翌年 1 月 30 日於車籠埔斷層保存園區的開幕典禮中正式地再次對外亮相。然而，重新開挖自今約兩個年頭，槽溝的保存不易，過度的潮溼致使牆面發霉，及地下水的滲流也導致牆面坍蹋。底下報導為牆面坍蹋前的調查結果，同時整合之前的開挖剖面，繪製槽溝中的斷層三維幾何形貌及其構造之演育。

2.4.1 2012 年的新開挖剖面

2012 年原址重挖的竹山槽溝為車籠埔斷層保存園區的重要秀場，圖 2.4.1 為園區為竹山槽溝所設的觀景台及小巨蛋的鋼架保護結構。重挖的竹山槽溝不似先前的方方正正，特別是在南牆有個大凹洞，槽溝長約為 25.0 公尺，寬約為 17.5 公尺，深約為 8 公尺，少 2001 年的槽溝一個階面，如圖 2.4.2 所示。寬度之所以變大許多，主要是因此舊槽溝掩埋前，曾受嚴重的雨水侵蝕破壞而坍塌，特別以北牆及南牆西南端的下盤處最劇。推估北牆約往西北方加寬 3 公尺，南牆東北端牆面則僅約往東南方加寬半公尺。圖 2.4.3 為南牆主要變形處的照片，相較於 2002 年開挖南牆照片(圖 2.4.4)，兩照片中牆面上的地質構造差異不明顯，幾乎一樣。圖 2.4.5 為北牆的照片及構造地質圖，相較於 2001 年開挖北牆(圖 2.1.6)，有極顯著的差異，背斜構造不再完整，其前翼中的沉積單元 3~5 皆為斷層明顯地錯移。此外，下位斷層也不似規矩地截切向斜構造的軸面。然而，藉由兩不同時期開挖槽溝的東牆正面照片，見圖 2.4.7，可推知南北牆上主要構造的差異為下位斷層及上位斷層側向上的分岔現象及不同垂直剖面上錯距不同之故。

2.4.2 三維斷層形貌及構造演化

圖 2.4.8 為整合兩次的開挖槽溝，數個不同牆面剖面之斷層資料，所繪製的斷層三維幾何形貌之示意圖，主要由下位斷層(L)及上位斷層(U)組成，斷面邊線的粗細表示錯距量(separation)的大小。圖中示意下位斷層(L)及上位斷層(U)，

為由一主斷層面於地表面下約十幾公尺處，分岔而成的兩分支斷層。下位斷層的傾角與主斷層約略相同，約 24˚~26˚，向上延伸，約於地震撓曲崖下方約 3~4 公尺處，傾角變緩轉呈近似水平(即沿層面滑移)，錯距量也由兩公尺減為僅數公分，且有斷面分岔的現象，斷層面的連續性佳，但未斷裂至地表，於東南側出現小缺口，是發生在含黏土礦物較高的沉積單元 4(unit 4)中，似以塑性變形取代脆性斷裂。下位斷層的傾角較主斷層為大，東南側約~40˚(西北側約~30˚，斷層面向上延伸，切出地面，轉為與地面一致，錯距由深處到地面，為 4 公尺多到 2；下位斷層的形貌，隨地震撓曲崖的地表剖面形態及走向(trend) 的往西北變化，有顯著的改變，其錯距的漸減，切出地表面的位置也隨之改變，由撓曲崖的底面(sole)，漸轉為撓曲崖上方反曲點的位置，甚至出現缺口，進而轉變為成組的扭梳面(twist hackles；Younes and Engelder, 1999)，如此的變化可能與斷層走向的轉變有極大的關係，使斷層的滑動由原本的純逆滑移，轉為帶有部份的右移分量。

2.4.3 構造演繹另釋

先前已說明過，921 地震在竹山槽溝的場址約造成地表 1.4~2.0 公尺的垂直抬升，但變形集中帶兩側呈水平的沉積單元，最大垂直落差卻有 7.0 公尺，明顯可知，不只一次的地震變形發生在此場址中。加上，上位斷層上盤的水平沉積單元及地表面，於 921 地震後，於南北牆剖面高程上幾乎相當，然而北側地表剖面類似單斜褶皺，與南側類似拋物線狀(parabolic profile)明顯不同，透過精細構造作圖成果(圖 2.4.4 及圖 2.4.6)之分析，認為北側的上位斷層並未全然切穿各沉積單元以斷層擴展褶皺作用其將上盤的水平沉積單元及地表面抬升，南側上位斷層切出地表，以斷層作用其將上盤抬升(圖 2.4.9.A)，地表剖面形態不同乃變形機制不同所致。再根據上位斷層及下位斷層的幾何位態，可進一步推測於深處(>10 公尺)兩斷層將可能合為一體。

圖 2.4.9.A 及 B 下盤沉積單元 2(unit2)中的黑色虛線示意，921 地震的前一次地震斷層錯動後的變位地表面。北牆下盤中的沉積單元 3(unit3)中，可見最上

部的古土壤遭褶曲，且為斷層截穿，此斷層跡並為在 2001 年的牆面出現，但於 2005 的牆面剝製工程的新剖面中明顯可見。此外，Chen et al. (2007)的報導，也顯示此為最後第二次古地震斷層錯動所致。此次的地震錯動認為應發生在下位斷層，因此圖 2.4.7.9 中的單斜褶皺短翼中的沉積單元之位態，也隨之變得更陡些(圖 2.4.9.B)。至於，最後第三次古地震斷層錯動，是造成 2001 年槽溝中的南北牆構造形式不同的分歧點，於南牆的位置斷層錯動量主要發生在上位斷層，且切穿當時的地表面，造成沉積單元 6 的部份，堆積在當時的地震撓曲(斷層)崖下(圖 2.4.9.C)；於北牆的位置斷層錯動量主要發生在下位斷層，其上盤的沉積單元則被斷層擴展褶皺作用給予抬升，而與南牆上位斷層的上盤沉積單元相略等高。圖 2.4.9.D 則為最後第三次古地震斷層錯動前的南北牆之構造形態，為近乎相似的單斜褶皺(monocline)。

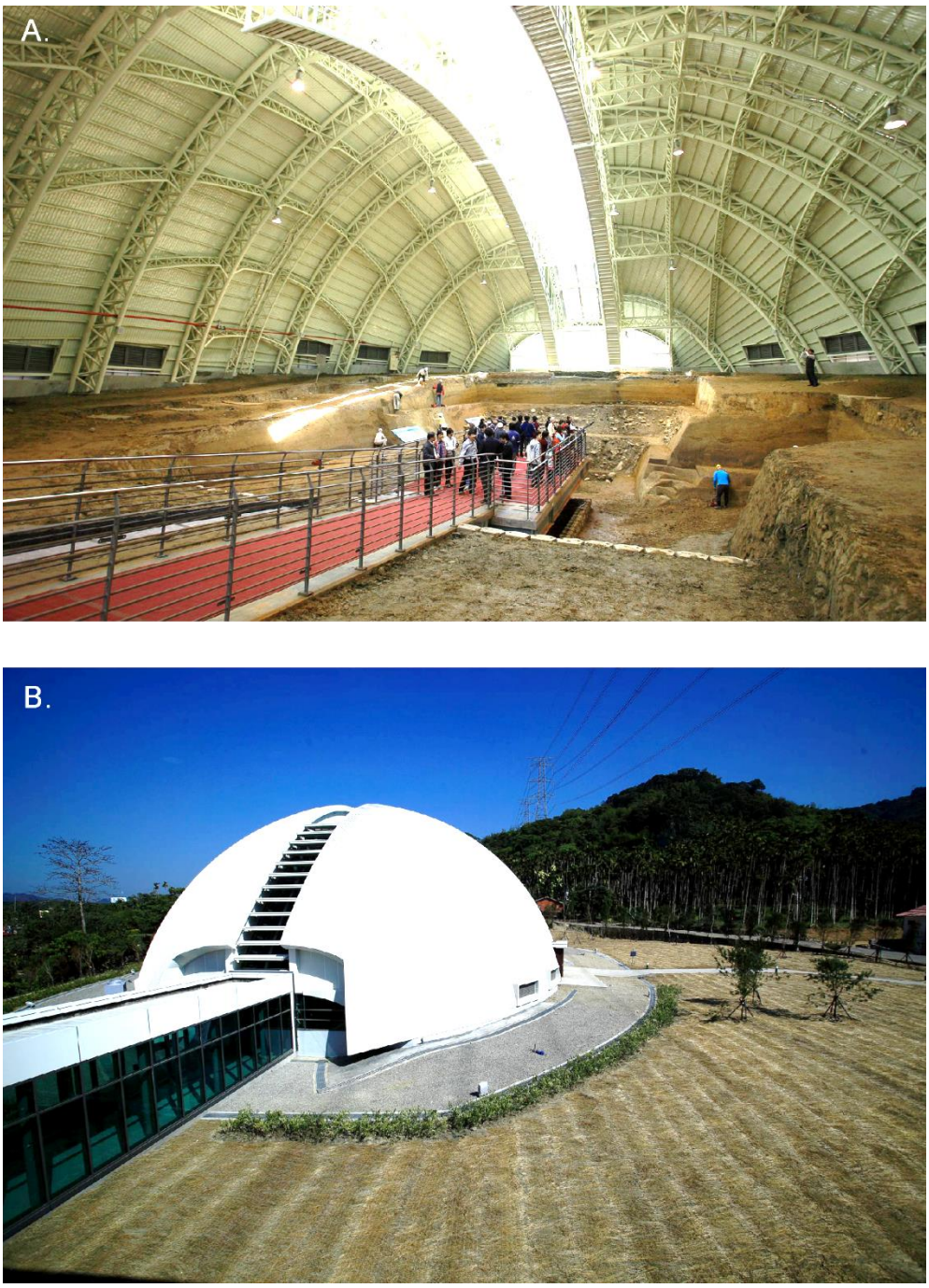


圖 2.4.1 車籠埔斷層保存園區中重開挖的竹山槽溝及其保護結構。A.竹山槽溝於保護結構中的場景。B.保護竹山槽溝的人造結構外觀。

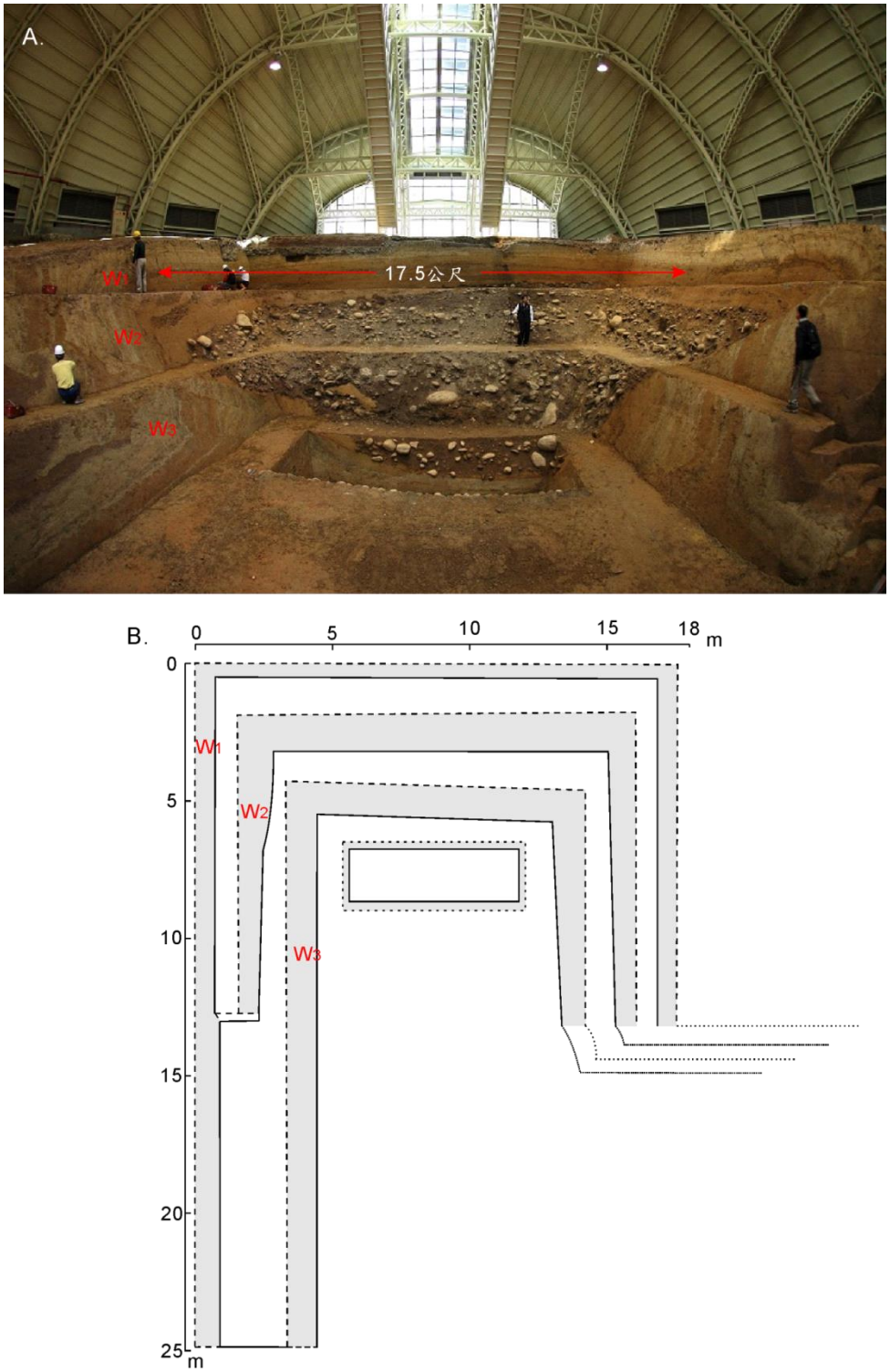
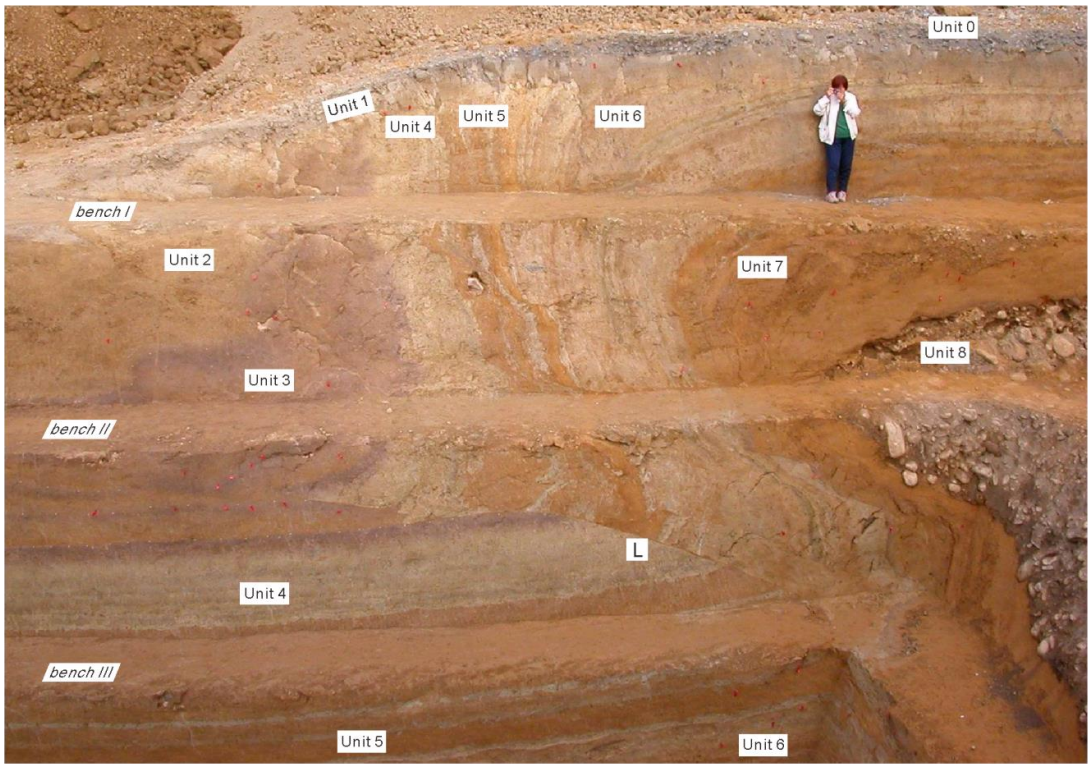


圖 2.4.2 竹山槽溝重新開挖後的樣貌。A.現地照片，B.現地測量後所繪製的水平投影圖



圖 2.4.3 竹山槽溝重新開挖後的南牆剖面

A.



B.

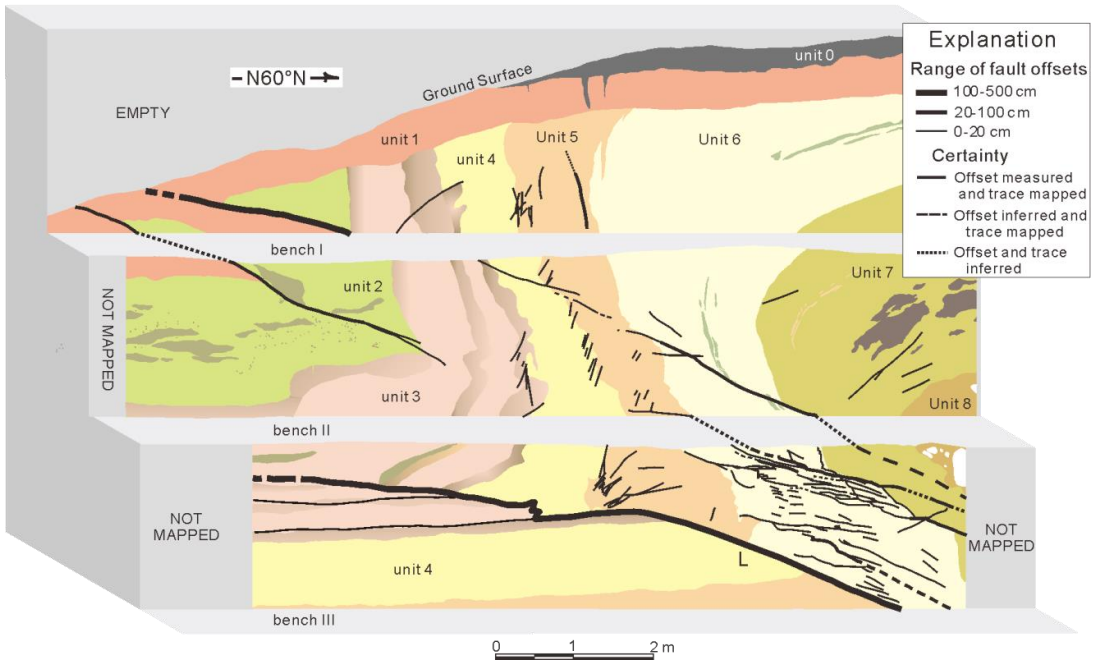


圖 2.4.4 竹山槽溝 2001 年開挖北牆主要變形處的剖面。A.現地照片。B.細部構造地質圖

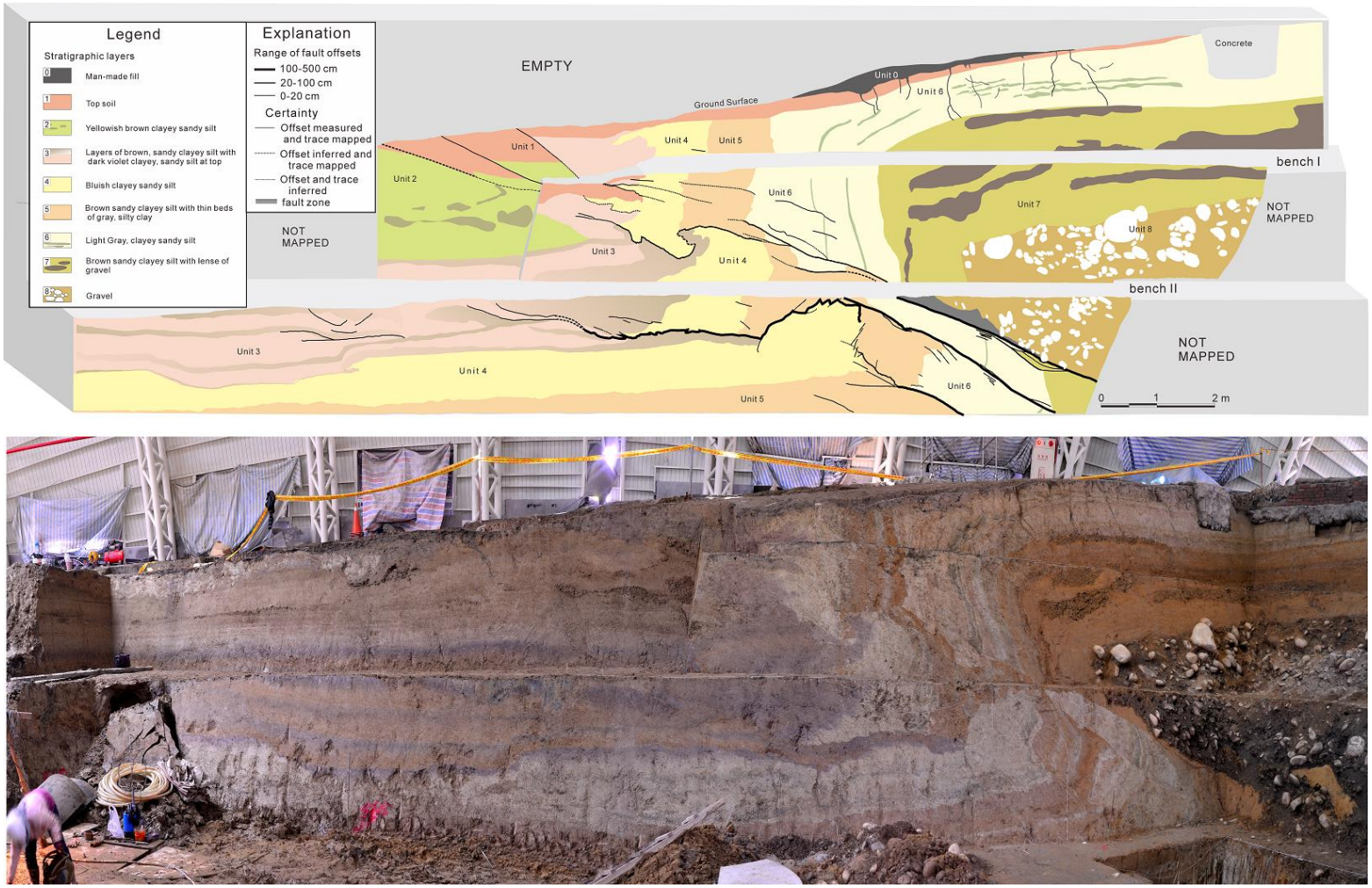
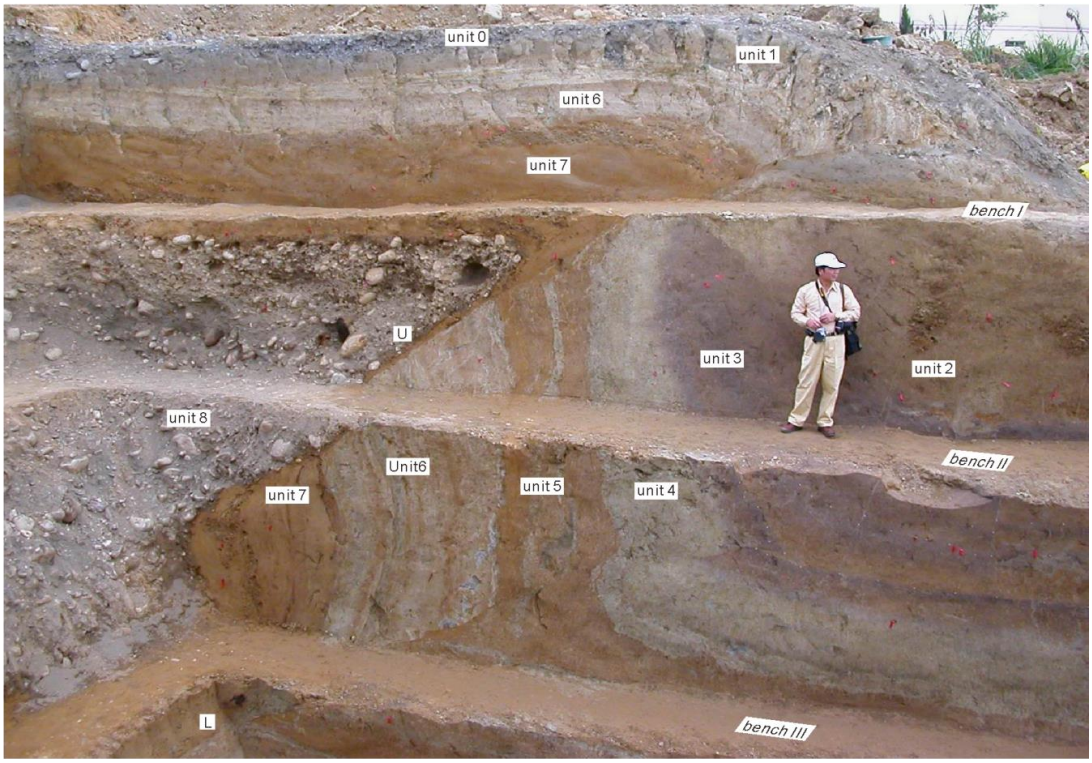


圖 2.4.5 竹山槽溝重新開挖後的北牆剖面(照片為蔣正興提供)

A.



B.

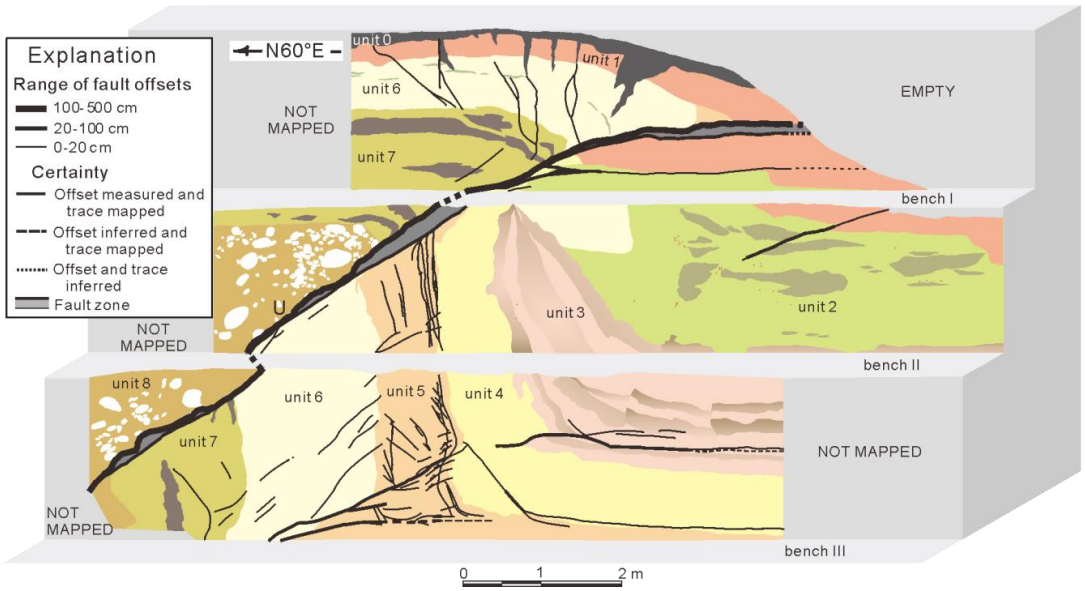


圖 2.4.6 竹山槽溝 2001 年開挖南牆主要變形處的剖面。A.現地照片。B.細部構造地質圖

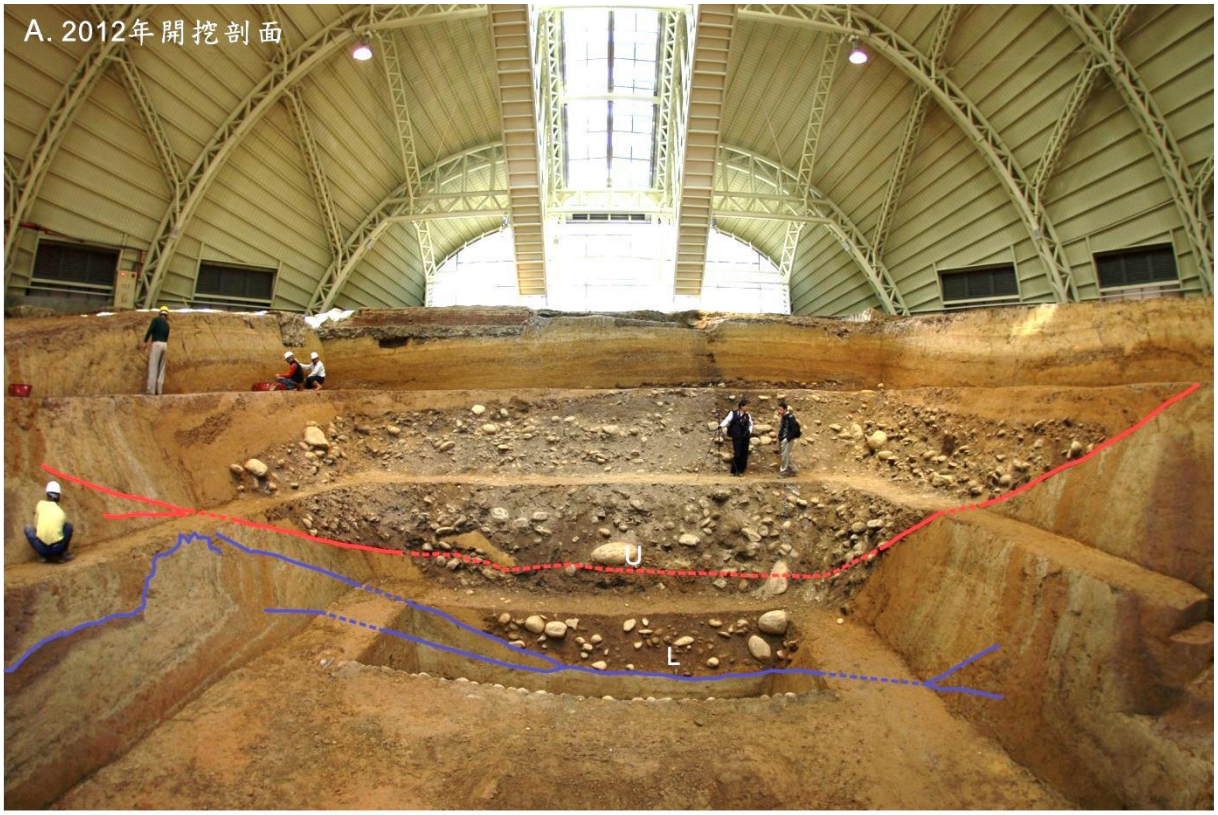




圖 2.4.7 竹山槽溝東牆正面照。A.2012 年的槽溝(照片為劉彥求提供)；B.2001 年的槽溝。藍色線段為下位斷層；紅色為上位斷層(照片為林偉雄提供)。

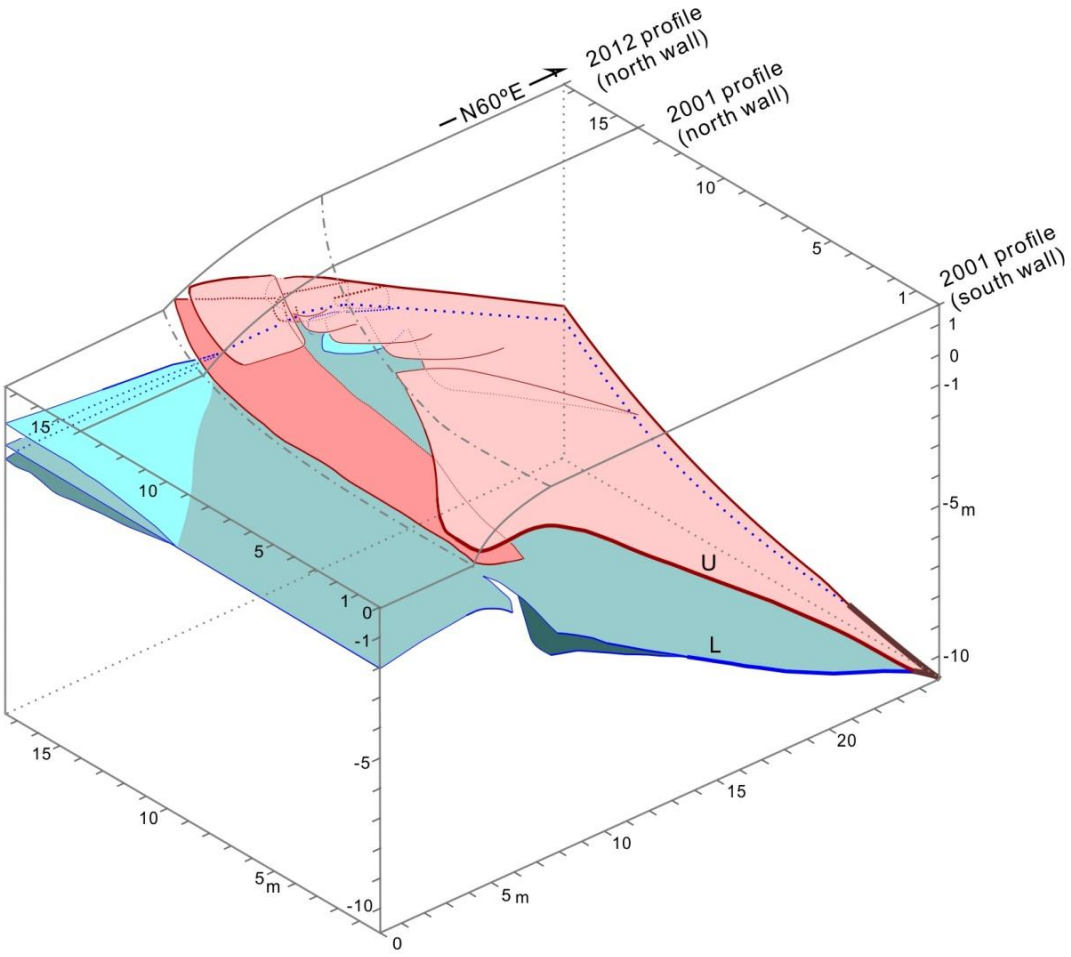


圖 2.4.8 竹山槽溝中斷層形貌三維的示意圖。U 為上位斷層(Upper fault)，L 為下位斷層，由兩者的位態推測，應於一定深度(約 10~15m)後，合併為一，斷層面邊線的粗細示意錯距(separation)的大小。

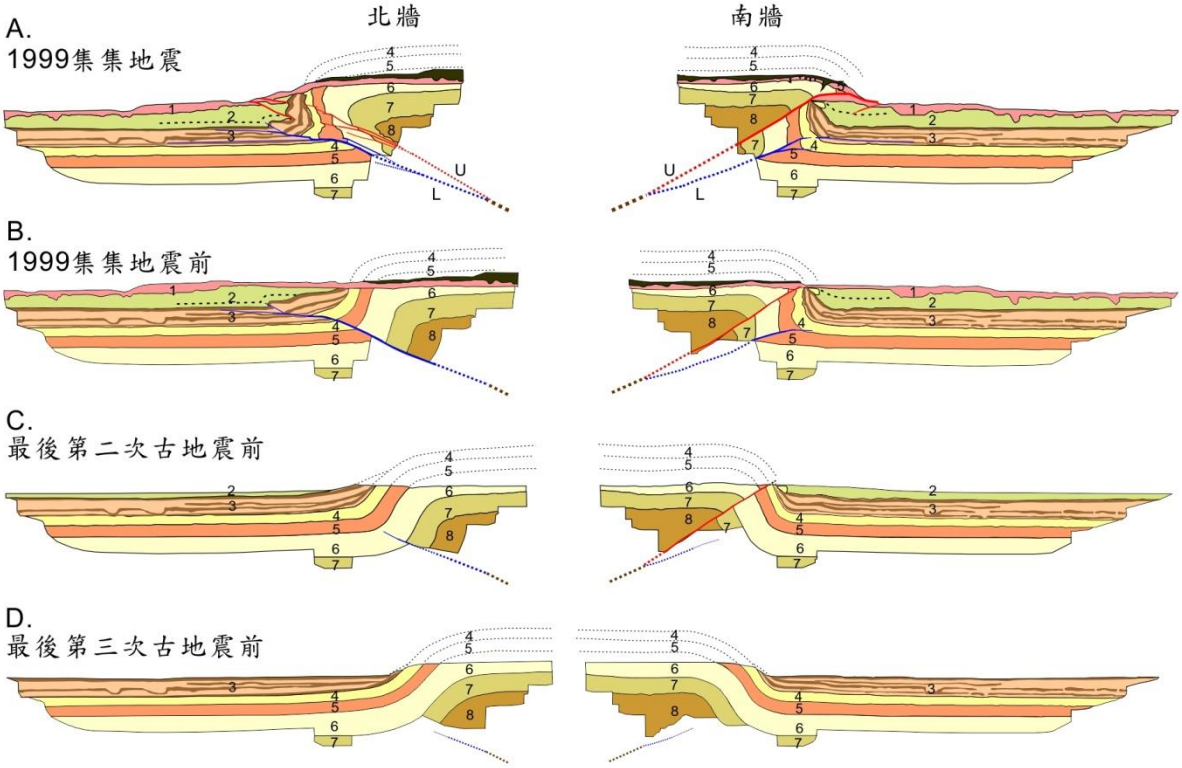


圖 2.4.9 竹山槽溝構造之演繹圖(修改自 Chen et al.,2007)。藍色線為下位斷層(lower fault)，紅色線為上位斷層(upper fault)，棕色線為主斷層，斷層跡線的粗細示意斷距的大小，虛線代表推測。

第三章、砂箱實驗研究成果

3.1 斷層離心模型實驗介紹

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相同的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 3.1.1)。而表 3.1.1 為離心模型與原型(prototype)相似性的比較表。模型內的應力與原型的應力相似是離心模型試驗最大的優點及特色。

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 3.1.2 所示。中大地工離心機的有效旋轉半徑為 3m，荷載容量為 100 g-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 80 g，最大載重則為 400 kg。

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)覆土層厚度；(2)不同種類的上覆土層(不同相對密度的砂土或不同剪力強度的黏土層)；(3)不同 g 值下，進行相同覆土層厚度的試驗；(4)不同基盤的粗糙度及基盤的型態。另外能夠在不同 g 值飛行情況下，利用地表變位掃瞄台車量測地表斷層剖面的的發展及演化情形。

本研究設計的斷層錯動模擬試驗箱尺寸，受限於離心機掛台空間(長×寬×高)

及掛台容許載重(400kg)的限制，因此斷層錯動模擬試驗箱的最大外部尺寸，設定為長×寬×高 =100 公分×528 公分×67.5 公分。斷層錯動模擬試驗箱分成上下兩層，下層為驅動斷層上下錯移機械機構所佔用的空間，包括斷層頂升或下降機構，該機械機構利用正反螺紋合金鋼螺桿，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 3.1.3(a)為斷層錯動模擬試驗箱，圖 3.1.3(b)則為所裝置地表剖面掃瞄台車的照片。圖 3.1.4 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 3.1.5 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。

A. 試驗用石英矽砂及砂試體床的製作

本系列試驗利用乾燥石英矽砂，利用空中實降法來製作砂試體床，進行正斷層或逆斷層錯動離心模型試驗。試驗砂床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。

B. 人工黏土及黏土試體床

本研究採用皂土(bentonite)及乾油(glycerin)，利用分層靜壓方式，來準備黏土試體床，利用如圖 3.1.6 所示的流程，來製作人工黏土試體床或黏土與砂土互層試體。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 3.1.7 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黏土試體床。

C. 斷層錯動的試驗流程

完成試體製作的砂土試體、黏土試體床或砂黏土互層的試體床，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，直至試驗預定的 g 數(40g、70g 或 80g)為止，此階段的量測主要是量取從 1g 到 80g 砂土層或黏土層地表的沈陷量。到達試驗預定 g 值(40g、70g 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。

本計畫共進行 84 組正逆斷層錯動試驗，表 3.1.2 說明本計畫四年所完成正逆斷層錯動試驗的試驗內容、編號及試驗條件。試驗的變數包括覆土層種類(純砂土地盤、不同不排水剪力強度(S_u)的純黏土地盤以及砂土與黏土互層地盤包括黏土覆蓋砂土層及砂土覆蓋黏土層)、不同覆土層厚度等。

表 3.1.1 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/sec2	N
長度 (linear dimension)	m	1/N
應力 (stress)	kPa	1
應變 (strain)	-	1
密度 (density)	kg/cm3	1
質量或體積(Mass or volume)	kg or m3	1/N3
單位重 (unit weight)	N/m3	N
力 (force)	N	1/N2
彎矩(Bending moment)	Nm	1/N3
Bending moment/unit width	Nm/m	1/N2
Flexural stiffness/unit width (EI/m)	Nm2/m	1/N3
壓密時間(time: diffuse)	s	1/N2
時間(time: dynamic)	s	1/N
頻率(frequency)	1/s	N

表 3.1.2 四年期間完成的試驗編號及試驗條件(共 75 組)

試驗編號	覆土層相對密度(Dr) %	覆土層厚度*(cm)	抬升高度#(cm)
1gRtest1	40	20	5.0
1gRtest2	40	10	5.0
1gRtest3	70	10	5.0
1gRtest4	70	20	5.0
10gRtest5	70	20 (2m)	3.8 (0.38 m)
10gRtest6	70	20 (2m)	5.0 (0.50 m)
10gRtest7	70	20 (2m)	1.30 (0.13 m)
10gRtest8	70	20 (2m)	3.5 (0.35 m)
40gRtest9	70	20 (8m)	5.0 (2.0 m)
80gRtest10	70	20 (16m)	5.0 (4.0 m)
40gRtest11	70	20 (8m)	5.0 (2.0 m)
80gRtest12	70	20 (16m)	5.0 (4.0 m)
80gRtest13	70	20 (16m)	3 (2.4 m)
1gRtest14	70	20	5.0
80gRtest15	70	20 (16 m)	5.0 (4.0 m)
1gRest16	70	20	3.5
40gRtest17	70	20 (8 m)	5.0 (2.0 m)
1gNtest18	85	20	5.0
1gRtest20	70	20	5.0
40gRtest21	70	20 (8 m)	5.0 (2.0 m)
80gRtest22	70	20 (16 m)	5.0 (4.0 m)
80gRtest23	70	20 (16 m)	5.0 (4.0 m)
80gNtest24	70	20 (16 m)	5.0 (4.0 m)
80gNtest25	70	20 (16 m)	5.0 (4.0 m)
40gNtest26	70	20 (8 m)	5.0 (2.0 m)
80gNtest27	50	20 (16 m)	5.0 (4.0 m)
80gNtest28	70	20 (16 m)	5.0 (4.0 m)
80gNtest29	70	20 (16 m)	5.0 (4.0 m)
40gNtest30	70	20 (8 m)	5.0 (2.0 m)
1gNtest31	70	20	5
40gNtest32-C	Clay	22 (8.8 m)	5.0 (2.0 m)
1gNtest33	70	20	5.0
1gNtest34	70	20	5.0
80gNtest35-F-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	18	(12.6 m)	2.5	(1.75m)
70gNtest73-growth(II)	70	20	(14 m)	5.0	(1.75m)
70gNtest74-F-C (s/B=1)	**70**	**20**	**(14 m)**	**5.0**	**(3.5m)**
70gNtest75-F-D(s/B=1)	**70**	**20**	**(14 m)**	**5.0**	**(3.5m)**
70gNtest76-F-B(s/B=1)	**70**	**20**	**(14 m)**	**5.0**	**(3.5m)**
70gRtest77-C/S (10/10)	**70-Clay-(100kPa)**	**20**	**(14 m)**	**5.0**	**(3.5m)**
70gRtest78-C/S(10/10)	**70-Clay-(50 kPa)**	**20**	**(14 m)**	**5.0**	**(3.5m)**
70gRtest79-C3/S7(06/14)	**70-Clay(100kPa)**	**20**	**(14 m)**	**5.0**	**(3.5m)**
70gNtest80-C/S(10/10)	**70-Clay(100kPa)**	**20**	**(14 m)**	**5.0**	**(3.5m)**
70gNtest81-C3/S7(06/14)	**70-Clay(100kPa)**	**20**	**(14 m)**	**5.0**	**(3.5m)**
70gNtest82-C/S(10/10)	**70-Clay-(50 kPa)**	**20**	**(14 m)**	**5.0**	**(3.5m)**
80gRtest83-T(9.2/12.5)**	**70**	**20**	**(16 m)**	**5.0**	**(4m)**
80gRtest84-T(7.3/10)**	**70**	**20**	**(16 m)**	**5.0**	**(4m)**
80gNtest85-T(5.5/12.5)**	**70**	**20**	**(16 m)**	**5.0**	**(4m)**
80gNtest86-T(4/10)**	**50**	**20**	**(16 m)**	**5.0**	**(4m)**

**括弧內數字代表隧道位置的模型尺寸，單位為公分

*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。

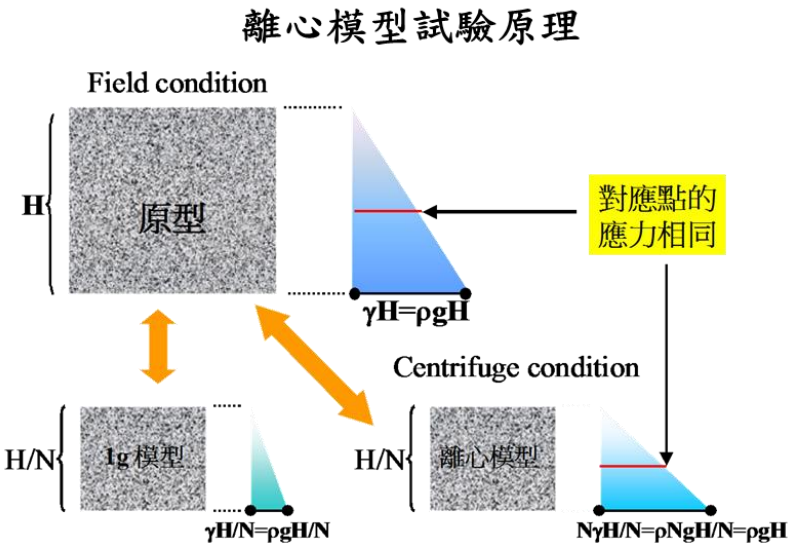
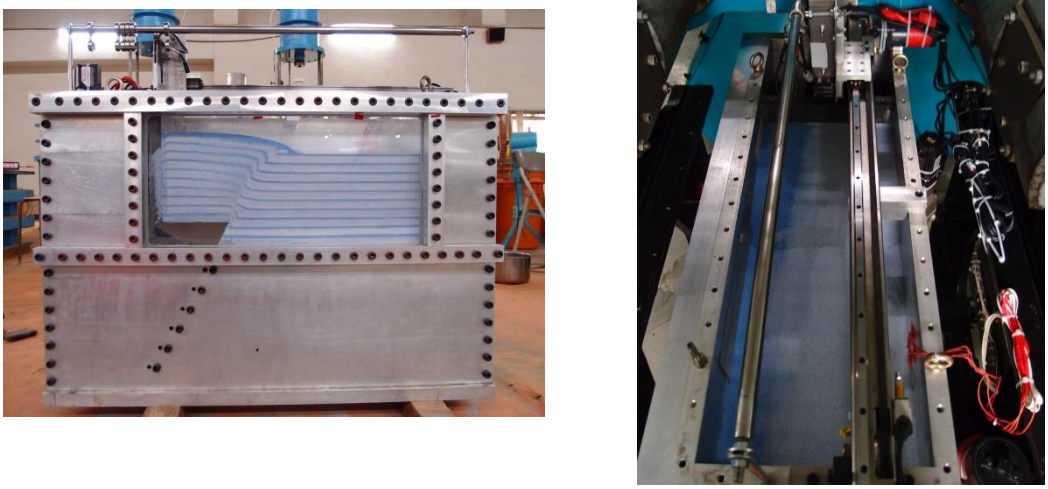


圖 3.1.1 原型、1g 模型與離心模型不同深度處對應點覆土應力之比較

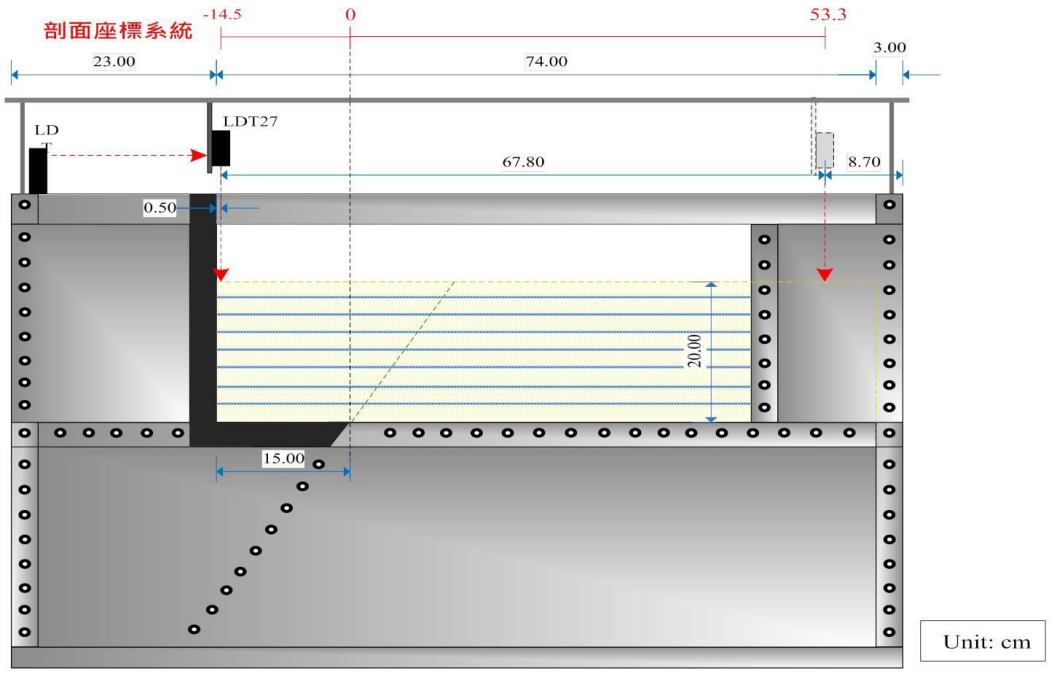


圖 3.1.2 中大地工離心機全景

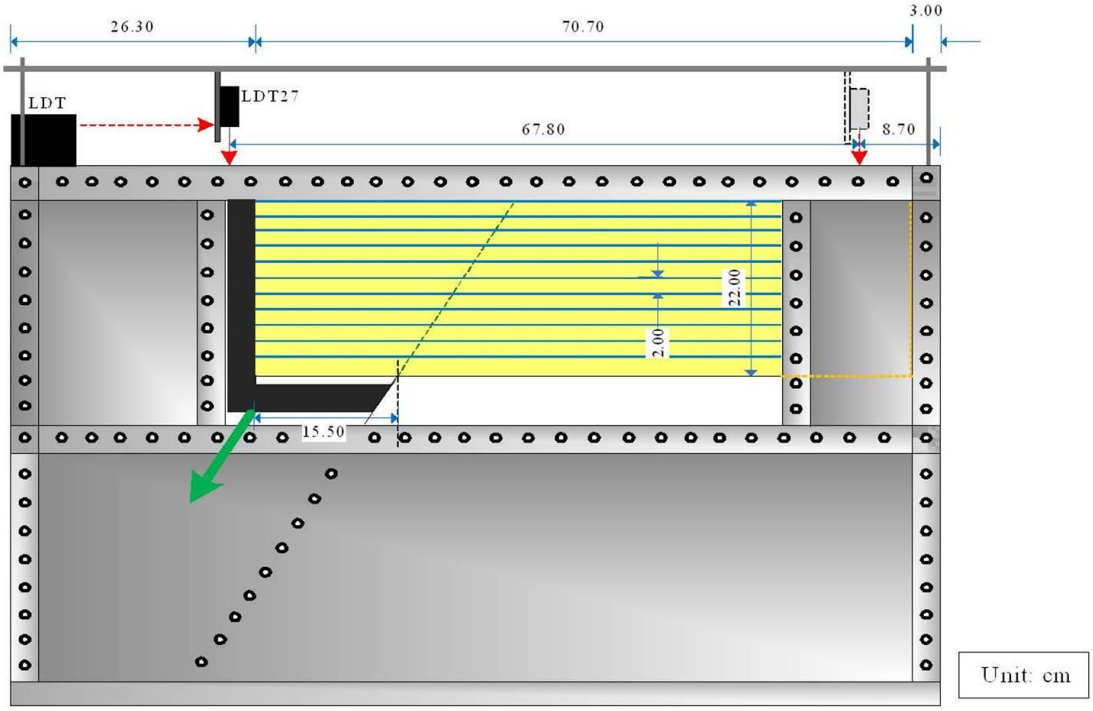


(a) (b)

圖 3.1.3 (a)斷層錯動模擬試驗箱；(b)地表剖面掃瞄台車

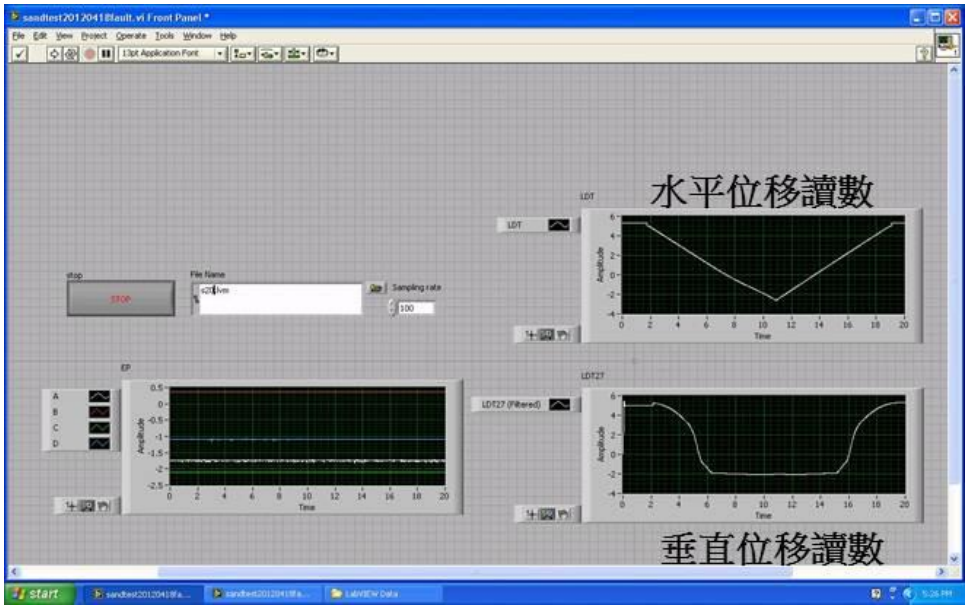


(a)逆斷層

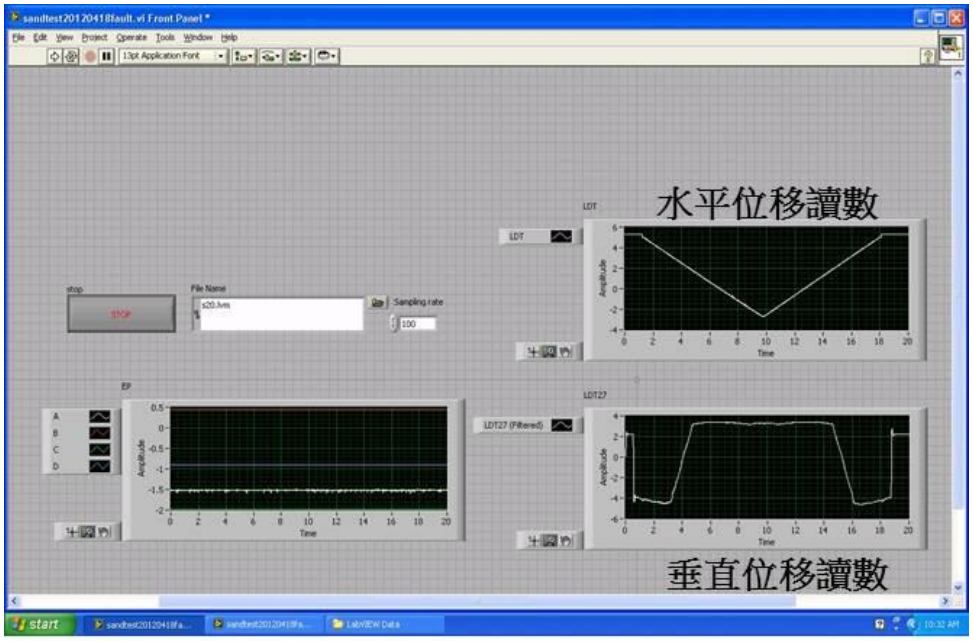


(b)正斷層

圖 3.1.4 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 3.1.5 掃瞄台車在正逆斷層錯動試驗過程中所量測之地表剖面

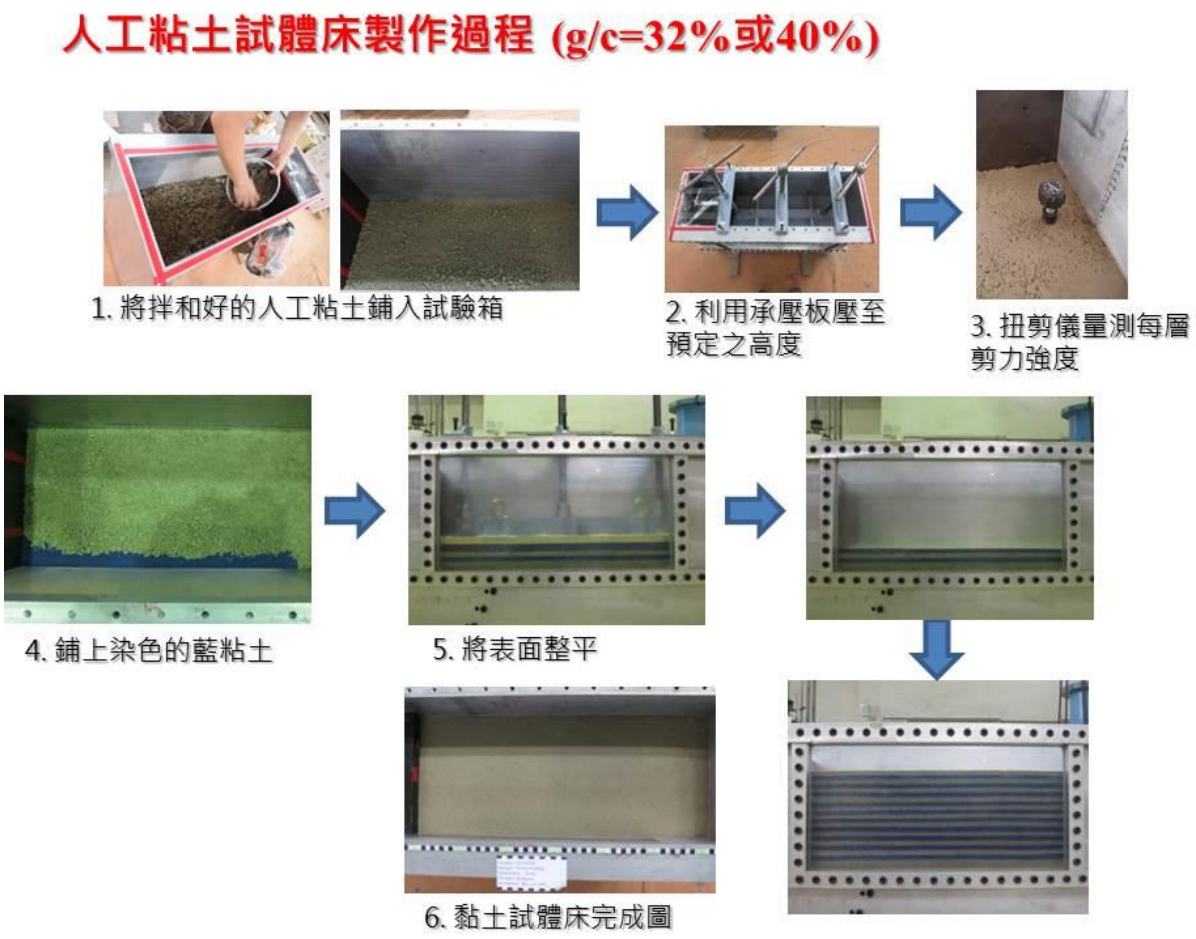


圖 3.1.6 人工黏土試體床(g/c=34%)之準備過程

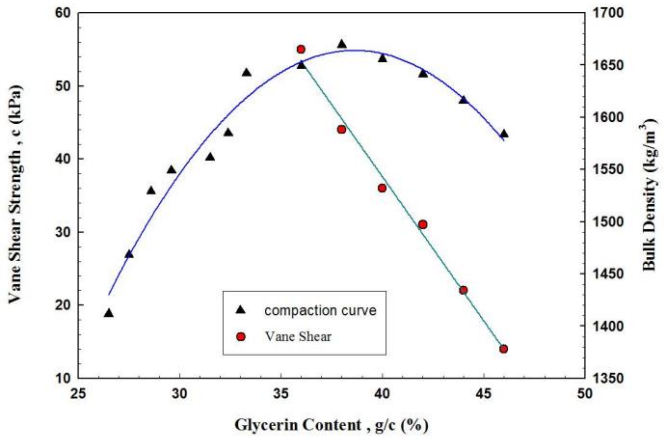


圖 3.1.7 人工黏土的夯實曲線及十字片剪力強度關係

3.2 逆斷層離心模型試驗的試驗成果

3.2.1 覆土層為砂土之試驗成果

利用掃瞄台車進行斷層剖面掃瞄，可以有效掌握在不同斷層錯動量下，地表剖面的變化。逆斷層基盤的垂直頂升錯動量(vertical throw)，h，設為正，覆土層厚度為 H。則垂直頂升錯動量比(r(%))的定義如下式所示：

$$r(\%) = \frac{h}{H} \times 100 \qquad \text{式 3.2.1}$$

本試驗每隔 h=2.5 mm 的斷層垂直頂升錯動量，掃瞄地表剖面一次。圖 3.2.1 及圖 3.2.2 為在 80g 的試驗條件下，逆斷層錯動試驗(80gRtest23)，在不同垂直錯動量下的地表變形剖面。圖中水平座標 0 處，代表斷層尖端所處位置。這兩圖顯示隨著垂直錯動量，h，的增加，斷層錯動所形成的邊坡角度逐漸增加，且逐漸向前崩落及堆積；垂直錯動量可以利用垂直錯動頂升高度來表示，也可以利用頂升高度與覆土層厚度的百分比(r(%))來表示。

本實驗最大垂直錯動量為上覆土層厚度的 25%。而圖 3.2.2 則可以顯示斷層錯動角度及位置與地表變形剖面之對應關係。圖 3.2.3 中的水平座標定義為正規化水平距離(normalized horizontal distance，d/H)等於觀測點距以斷層尖端為零點的距離，d，除以覆土層厚度(H)；而垂直座標則為正規化垂直頂升量(normalized uplift height)並定義為觀測點地表上升高度除以斷層基盤垂直頂升錯動距離(h)，該正規化地表變形剖面，在垂直錯動量超過上覆土層厚度的 8.75%後 ，則正規化地表變形曲線漸趨近於一致。

圖 3.2.4 及圖 3.2.5 為在 40g 的試驗條件下，逆斷層錯動試驗(40gRtest21)在不同垂直錯動量下的地表變形剖面。圖 3.2.6 及圖 3.2.7 為在 1g 的試驗條件下，逆斷層錯動試驗(1gRtest20)在不同垂直錯動量下的地表變形剖面。試驗的成果顯示在不同的 g 值試驗條件下，逆斷層錯動造成地表變位的趨勢大致一致，但是在 1g 的試驗條件下，地表變位剖面變化比較不平滑。圖 3.2.8 為逆斷層錯動試驗，在不同試驗 g 值下，兩個不同垂直錯動量（12.5%、25%）的地表變位剖面。圖中顯示高 g 的試驗有較平緩的坡度，特別在 1g 的試驗斷層坡度較陡，坡面也較不規則，這現象可能是砂土微小的吸力(suction)所造成。

逆斷層錯動試驗完畢後，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 3.2.9、圖 3.2.10 及圖 3.2.11 顯示在逆斷層錯動試驗，在不同 g 值的試驗條件下，垂直錯動量比(50mm，r=25%)的斷層跡(剪裂帶)發展剖面。雖然由前面的試驗成果發現，地表變形剖面並不隨著試驗 g 值的不同，而有太大的不同，但此三圖中顯示在低 g 值的試驗條件，地下土層發展出較寬大的剪裂帶；在高 g 的試驗條件，地下土層剪裂帶發展的範圍較小，最主要的原因可能是在高 g 情況下，砂土的膨脹角受到高覆土應力的抑制，相較於 1g 條件下的試體，高 g 試驗條件下地下土層剪裂帶，比較不容易發展，因此剪裂帶的寬度較窄。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。

試驗後由觀景視窗拍攝的照片，利用數位化軟體(digitizer)來追蹤並點出斷層錯動後(r=25%)地層的剪裂帶範圍，藉此建立數位剖面，可以提供後續的分析。圖 3.2.12 為 80g 試驗條件下，逆斷層錯動試驗斷層跡發展範圍的數位剖面。經由數位化後所得之數位剖面，連接不同高程土層的最小曲率的點，可以建立上下限破裂跡或剪裂帶的範圍(Chang, et al. 2013；Chang et al. 2013)。圖 3.2.13 為不同試驗 g(80g；40g； 1g)條件下，逆斷層錯動試驗斷層跡發展範圍的數位剖面及上限(黑線)下限(紅線)破裂跡的範圍，這個範圍是斷層錯動引致破裂帶的區域。這些破裂跡在端層尖端處沿著斷層傾角發展，然後在靠近地表彎向下盤。在相同的錯動比而有不同 g 值的試驗條件下，剪裂帶有相當大的不同。由圖 3.2.13 顯示 1g 試驗的剪裂帶有較多的褶皺線，而且剪裂帶的範圍也最寬；80g 的試驗結果顯示有最窄的剪裂帶範圍，而 40g 的試驗結果則發現剪裂帶的寬度則介於兩者之間。這是因為在低覆土應力(1g 試驗)的試驗條件下，砂土有較大的膨脹角(dilatancy angle)；而高覆土應力的試驗條件下，砂土有較小的膨脹角(dilatancy angle)所引致。

圖 3.2.14 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 3.2.15

在 80g 逆斷層試驗條件，不同相對密度砂土試體，試體厚度 16m，在垂直錯動量 4m(r = 25%)，斷層破裂面發展之比較。傾角 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床，由於下盤砂土剪力強度較低，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)。

3.2.2 覆土層為黏土之試驗成果

本研究採用兩種不同不排水剪力強度（su = 116kPa 及 su = 46kPa）的人工黏土試體，來進行逆斷層錯動試驗，探討不排水剪力強度對地表變形及地下破裂帶發展的影響。圖 3.2.16 及圖 3.2.17 分別為不同剪力強度純黏土試體進行逆斷層錯動試驗後(r = 25%)，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 su = 116kPa 的試體，地表變形剖面的範圍較窄；相反的，純黏土試體不排水剪力強度 su = 46kPa 的試體較有延展性(ductile)，地表變形剖面的範圍也較為寬廣。圖 3.2.18 為不同剪力強度純黏土試體及砂試體進行逆斷層錯動試驗後，地表剖面形狀及影響範圍結果之比較。純砂土試體有最窄的變形範圍，但有最陡的坡度。但是純黏土試體，隨著布排水剪力強度的增加，地表變形的影響範圍則變小。

3.2.3 覆土層為黏土與砂土互層之試驗成果

本節針對砂土層覆蓋黏土層或黏土層覆蓋砂土層的兩種不同互層地盤，進行逆斷層錯動離心模型試驗。探討此兩種互層地盤受到逆斷層錯動後，地表變形剖面的演化，並進行相互比較。本研究利用砂土上覆黏土層(S/C)或黏土上覆砂土層(C/S)兩種互層地盤，進行逆斷層錯動試驗，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 3.2.19 為純黏土試體(80gRtest46 C-H)及砂土覆蓋黏土的互層試體(其中 70Rtest60-S/C(10/10)，試驗編號的 S/C (10/10)，s_u = 100kPa，代表該試驗的互層地盤為 10cm 的砂土層，覆蓋在 10cm 的黏土層上面，而黏土層的布排水剪力強度為 100kPa)，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邊坡坡度。圖 3.2.20 為純黏土試體及砂土覆蓋黏土層之互層試體，逆斷層錯動試驗，地下破裂跡之比較，圖中顯示上覆砂層之試體，下層黏土層中之破裂跡，與純黏土試體

之破裂跡類似。圖 3.2.21 砂土覆蓋黏土之互層試體，逆斷層錯動試驗後(r = 25%)，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。由圖 3.2.22 亦顯示砂土與黏土界面所形成的坡度，較純黏土試體地表坡度為陡。

圖 3.2.23 及圖 3.2.24 為純砂土試體及砂土覆蓋黏土層之互層試體(C/S)，逆斷層錯動試驗，地表及地下剖面之比較。比較圖 3.2.1 與圖 3.2.24 顯示上覆砂層之試體整體有較平緩的邊坡，錯動影響範圍較廣；而純砂試體則在坡腳處有較陡的坡度，錯動影響範圍相對較窄。另外黏土上覆砂層之試體，在砂層內所發展之破裂跡，向下盤傾斜擴展也較遠。

圖 3.3.25 及圖 3.3.26 分別為逆斷層錯動試驗(70gRtest77-C/S (10/10)，s_u = 100kPa)，在不同垂直抬升量下的地表變位剖面以及在不同垂直抬升量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度的關係。試驗編號中的 C/S (10/10)，s_u = 100kPa，代表該試驗的地盤為 10cm 的黏土層覆蓋在 10cm 的砂土層上面，而黏土層的剪力強度為 100kPa。圖 3.2.27 及圖 4.2.28 分別為逆斷層錯動試驗(70gRtest78-C/S (10/10)，s_u = 50 kPa)，在不同垂直抬升量下的地表變位剖面以及在不同垂直抬升量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度的關係。圖 3.2.29 及圖 3.2.30 分別為逆斷層錯動試驗(70gRtest79-C03/07 (6/14)，s_u = 100 kPa)，在不同垂直抬升量下的地表變位剖面以及在不同垂直抬升量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度的關係。圖 3.2.31 為逆斷層錯動試驗，位於不同種類的互層地盤，受到 5cm 垂直錯動量，地表變位剖面與斷層位置及與 60 度斷層角度的關係。圖中顯示砂土覆蓋黏土層的試體，逆斷層錯動後，地表影響範圍較黏土覆蓋砂土層來的最廣。而黏土層覆蓋砂土層隨著黏土不排水剪力強度之增加，地表影響範圍則變窄，但會形成斷堐陡坡。上覆黏土層較薄，地表影響範圍也較窄，也會形成斷堐陡坡。

圖 3.2.32 為不同土層逆斷層錯動試驗，垂直抬升量 5 cm 後，地下剖面的比較：(a)70gRtest77-C/S (10/10)；(b)80gRtest46-C；(c)80gRtest23-S；(d)70gRtest60-S/C (10/10) 。圖 3.2.33 為不同土層逆斷層錯動試驗，垂直抬升量 5 cm，地表剖面的比較：(a)70gRtest77-C/S (10/10)；(b)80gRtest46-C；(c)70gRtest78-C/S(10/10)；(d)70gRtest79-C/S (06/14)。圖中顯示黏土覆蓋砂土層的試體，受到逆斷層錯動後，

地表會產生明顯的張裂縫；而純黏土試體地表裂縫則較小。

圖 3.2.34 為不同黏土層厚度的互層土壤，逆斷層錯動試驗，垂直抬升量 5 cm，地表及下剖面的比較：(a)70gRtest77-C/S (10/10)；(b)70gRtest79-C/S (06/14)；(c)70gRtest78-C/S(10/10)；(d)70gRtest79-C/S (06/14)。圖 3.2.35 及圖 3.2.36 分別為不同互層土層逆斷層錯動試驗，地下斷層跡剖面的比較。純砂試體地下破裂帶最窄，上覆黏土層會增加地下破裂帶的範圍，而且黏土不排水剪力強度愈低，地下破裂帶的範圍也愈為寬廣。

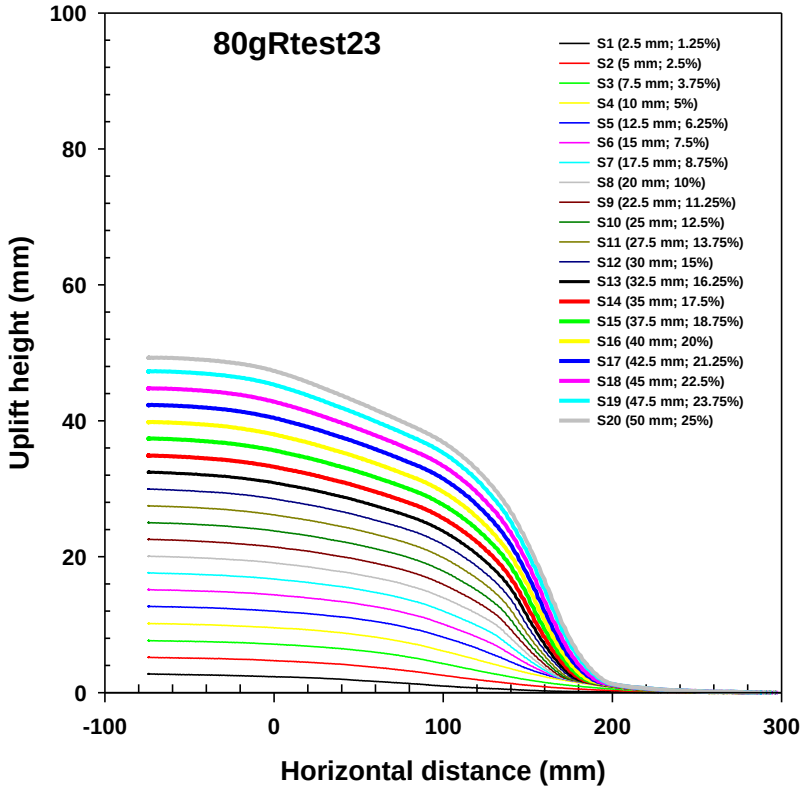


圖 3.2.1 逆斷層錯動試驗(80gRtest23)，在不同垂直錯動量下的地表變位剖面

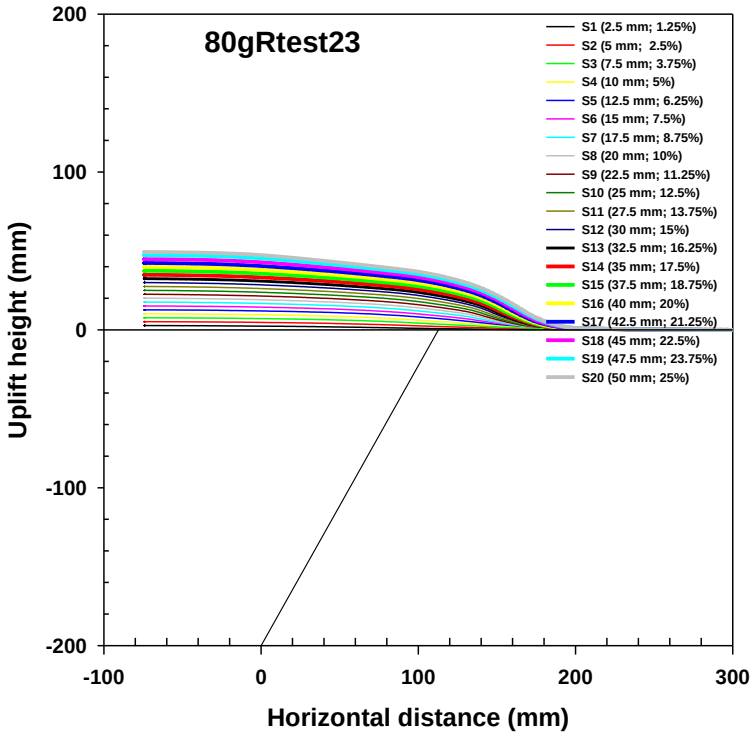


圖 3.2.2 逆斷層錯動試驗，在不同垂直錯動量的地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係(80gRtest23)

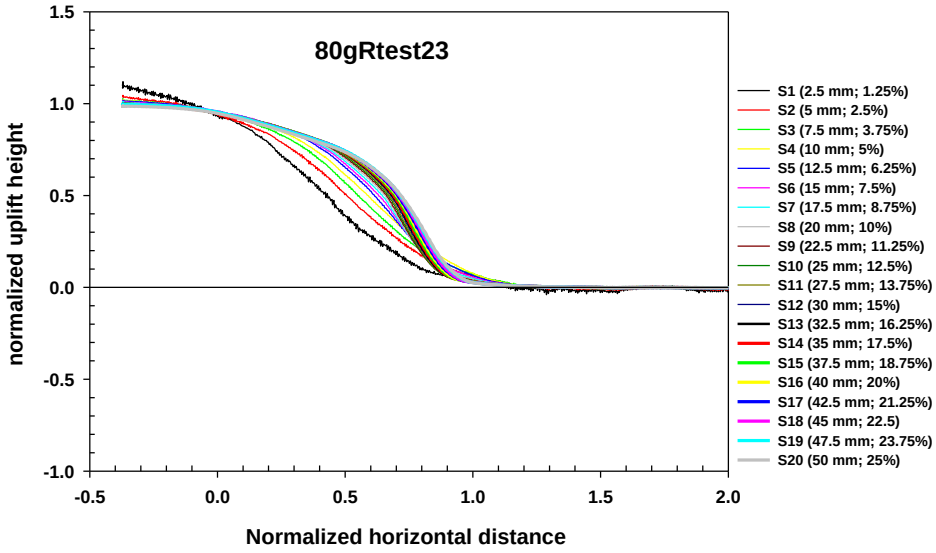


圖 3.2.3 逆斷層錯動試驗(80gRtest23)，在不同垂直錯動量的正規化地表變位剖面

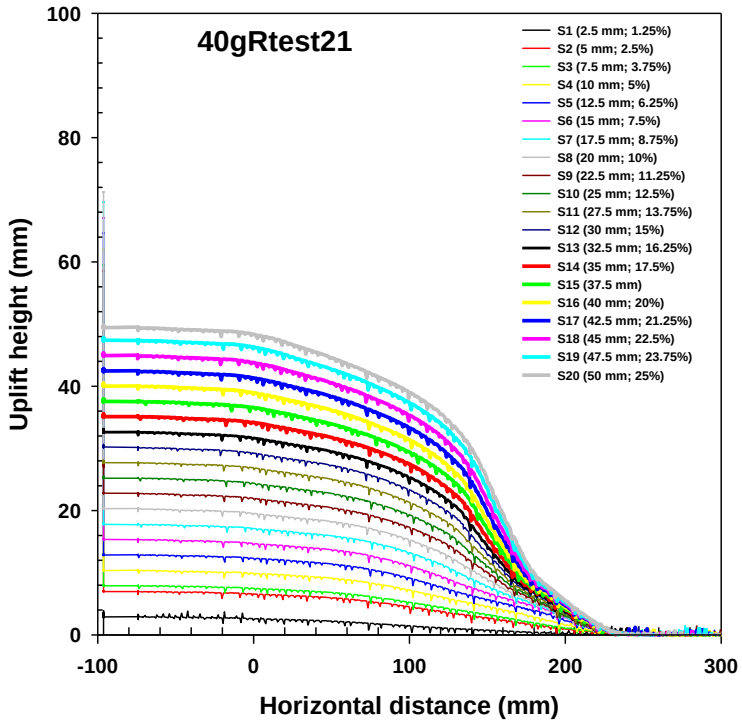


圖 3.2.4 逆斷層錯動試驗(40gRtest21)，在不同垂直錯動量的地表變位剖面

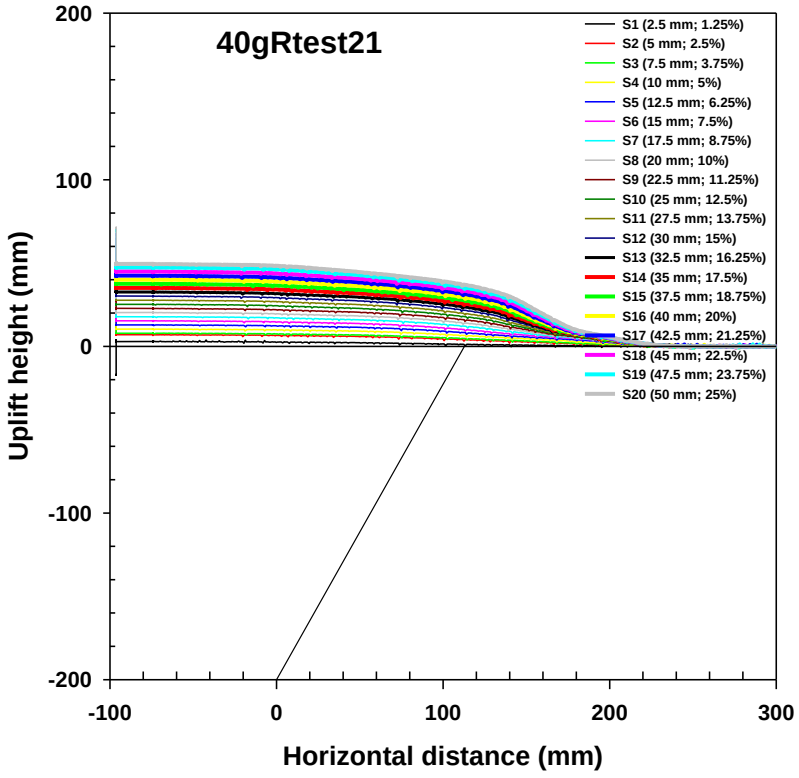


圖 3.2.5 逆斷層錯動試驗(40gRtest21)，在不同垂直錯動量的地表變位剖面

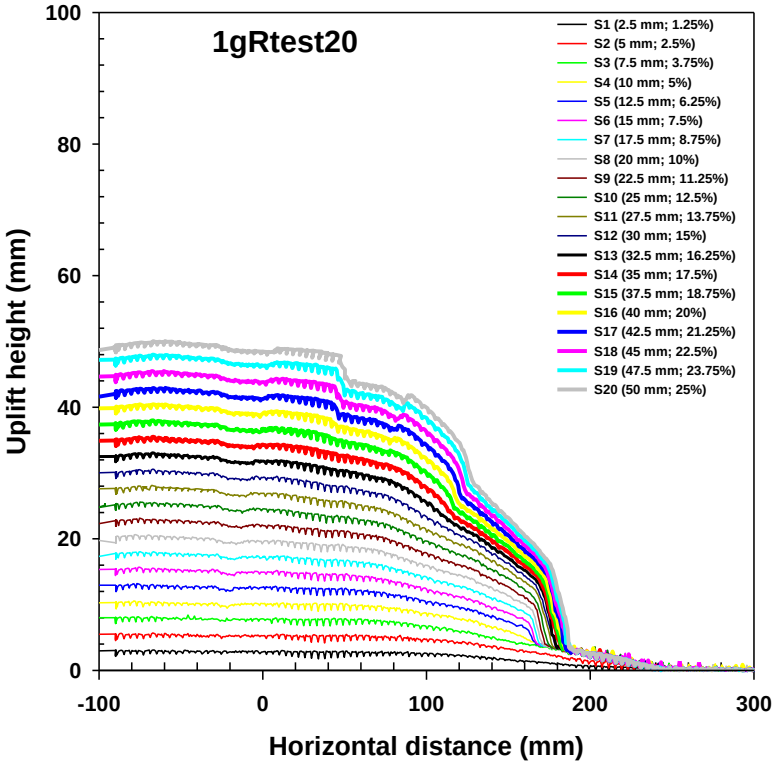


圖 3.2.6 逆斷層錯動試驗(1gRtest20)，在不同垂直錯動量的地表變位剖面

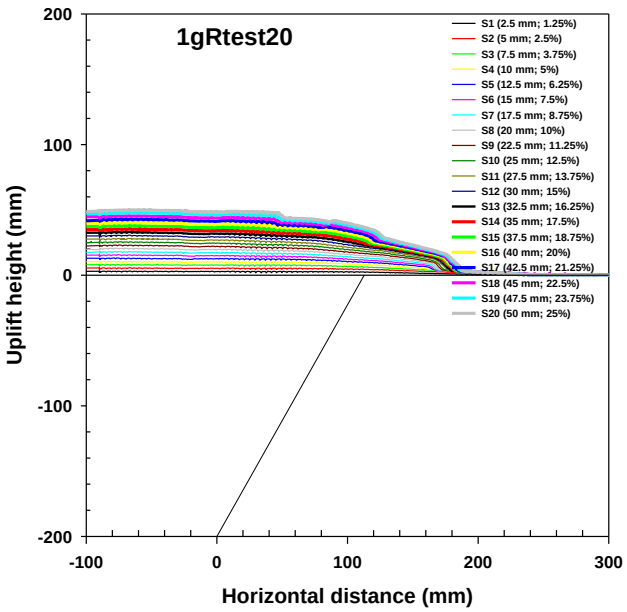


圖 3.2.7 逆斷層錯動試驗(1gRtest20)，在不同垂直錯動量的地表變位剖面

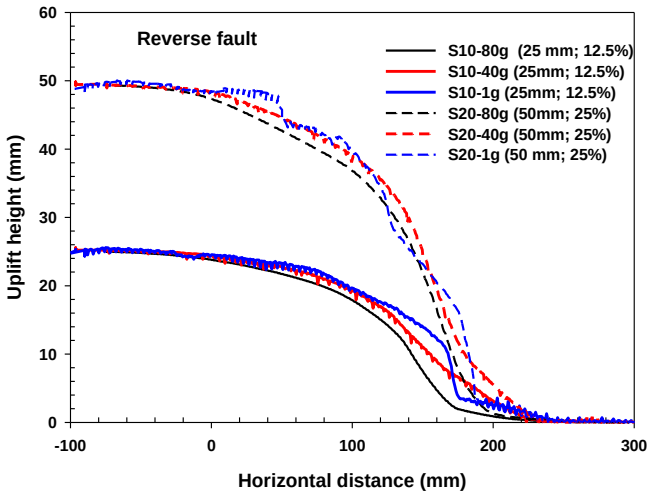


圖 3.2.8 逆斷層錯動試驗，在不同試驗 g 值下，不同垂直錯動量的地表變位剖面比較



圖 3.2.9 逆斷層錯動試驗在 80g 下斷層跡發展的側視剖面



圖 3.2.10 逆斷層錯動試驗在 80g 下斷層跡發展的側視剖面



圖 3.2.11 逆斷層錯動試驗在 1g 下斷層跡發展的側視剖面

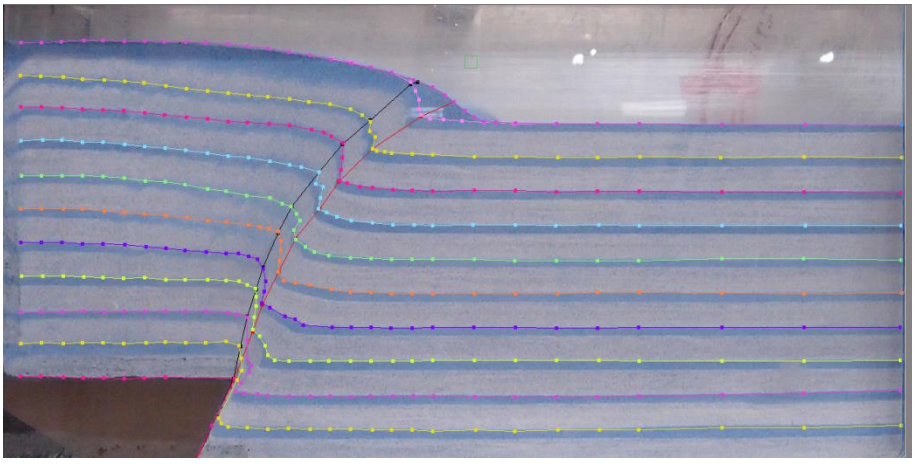
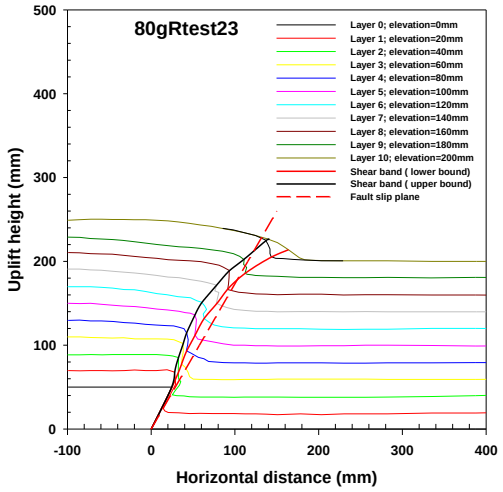
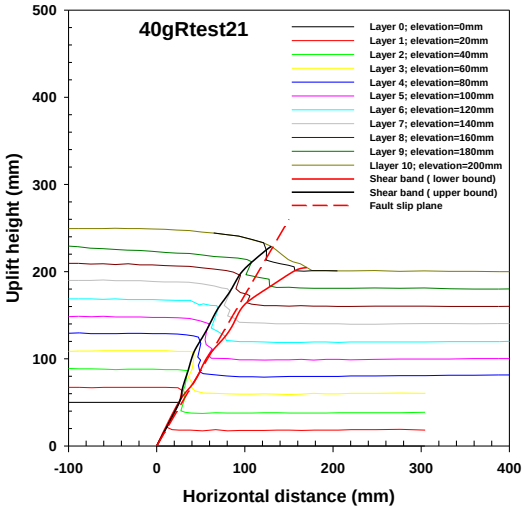


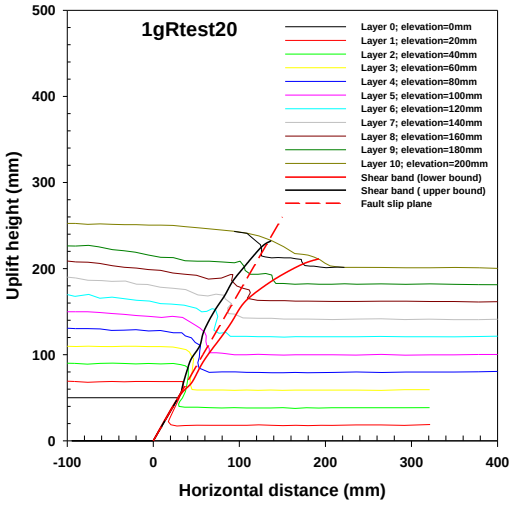
圖 3.2.12 逆斷層錯動試驗在 80g 下斷層跡發展範圍的數位側視剖面



(a) 80*g*



(b) 40*g*



(c) 1*g*

圖 3.2.13 逆斷層錯動試驗斷層跡發展範圍的數位剖面：(a)80g；(b)40g；(c)1g

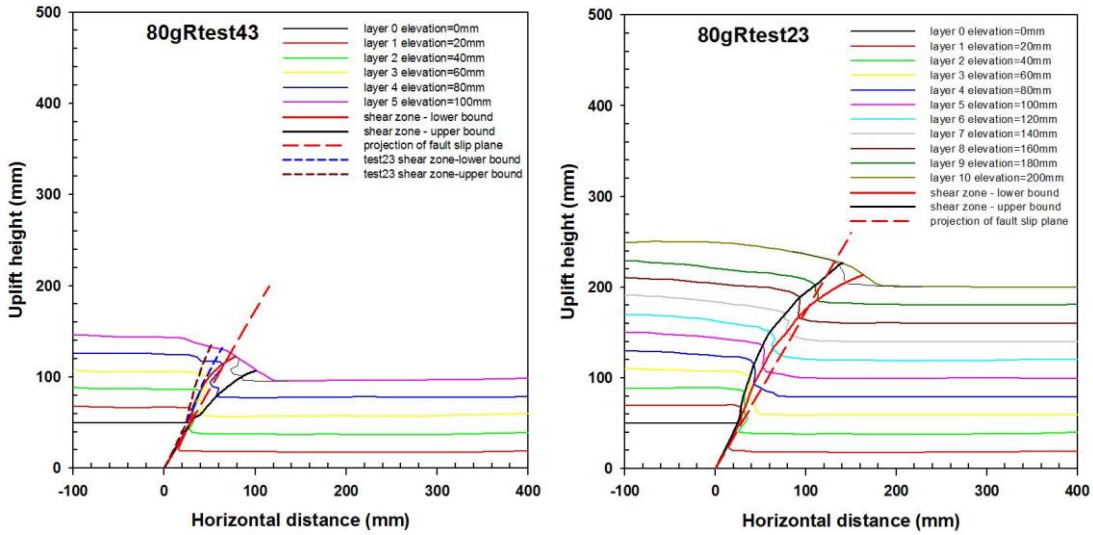


圖 3.2.14 80g 逆斷層試驗條件，不同覆土層厚度(16m 及 8m)，在垂直錯動量比（r=25%），斷層破裂面發展之比較。(a)覆土層厚度 16m ；(b)覆土層厚度 8m

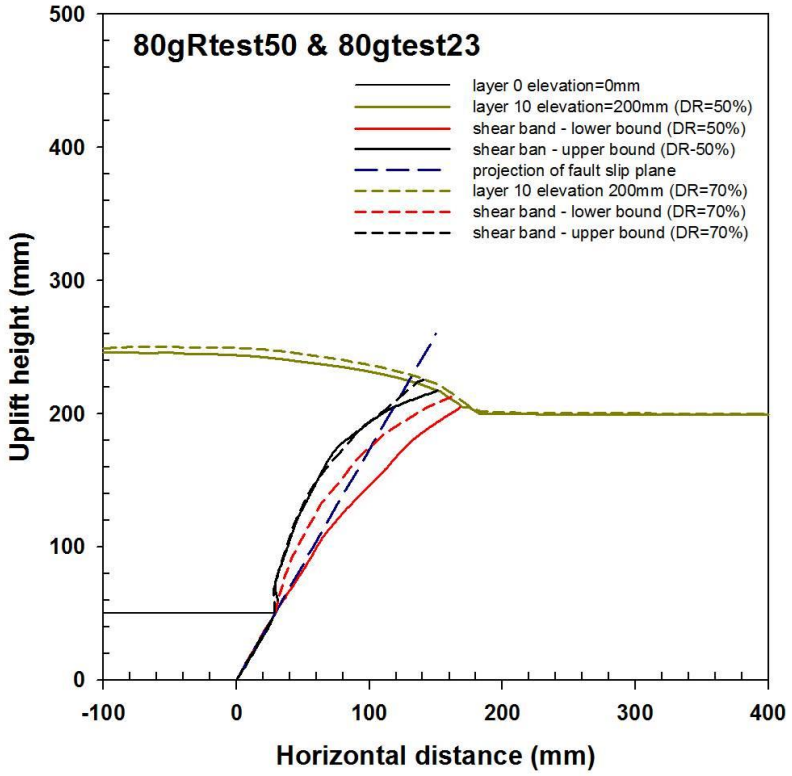


圖 3.2.15 80g 逆斷層試驗條件，不同相對密度砂土試體，垂直錯動量 4m(r = 25%)，破裂面發展之比較

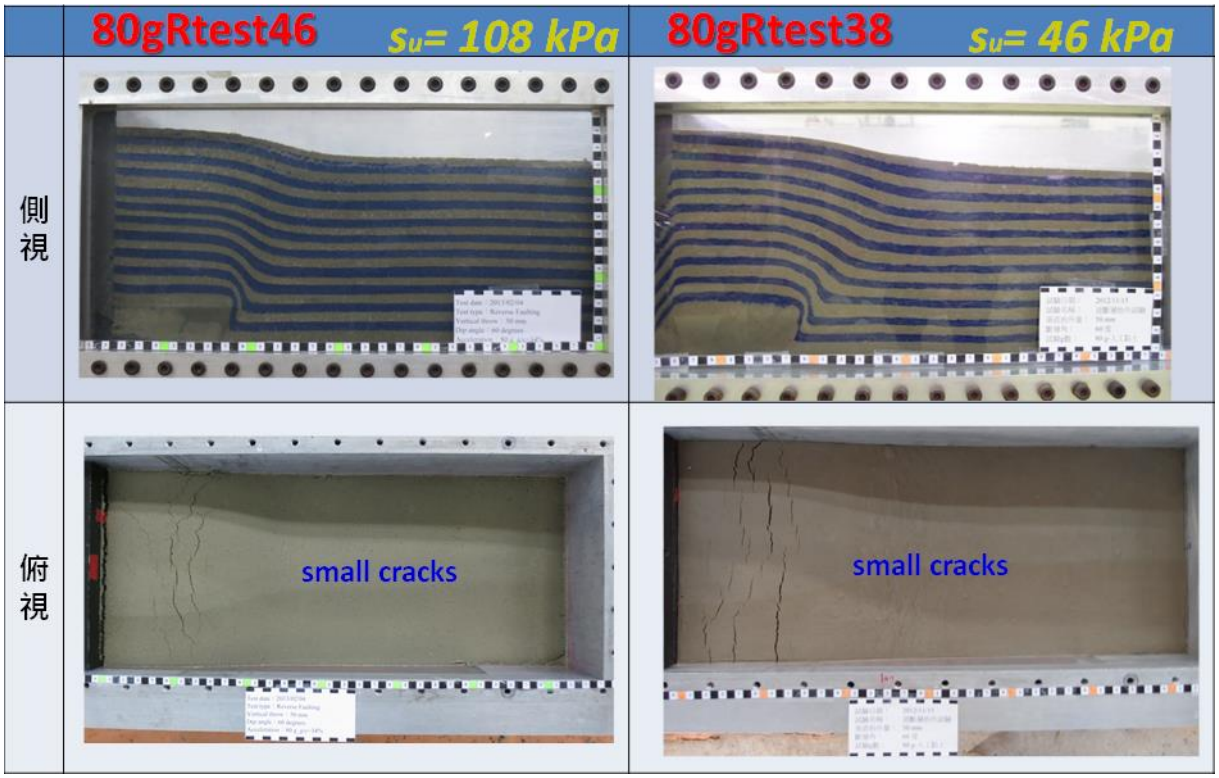


圖 3.2.16 不同剪力強度純黏土試體逆斷層錯動試驗結果之比較。(左圖)不排水剪力強度 su = 108kPa；(右圖)不排水剪力強度 su = 46kPa

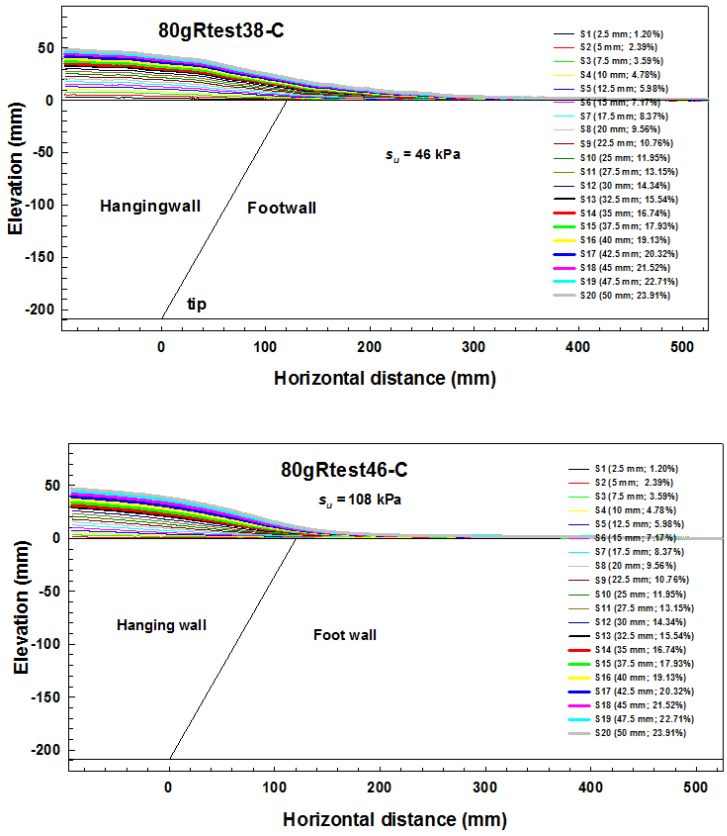


圖 3.2.17 不同剪力強度純黏土試體逆斷層錯動試驗，地表剖面結果之比較。(上圖)不排水剪力強度 su = 46kPa；(下圖)不排水剪力強度 su=108 kPa

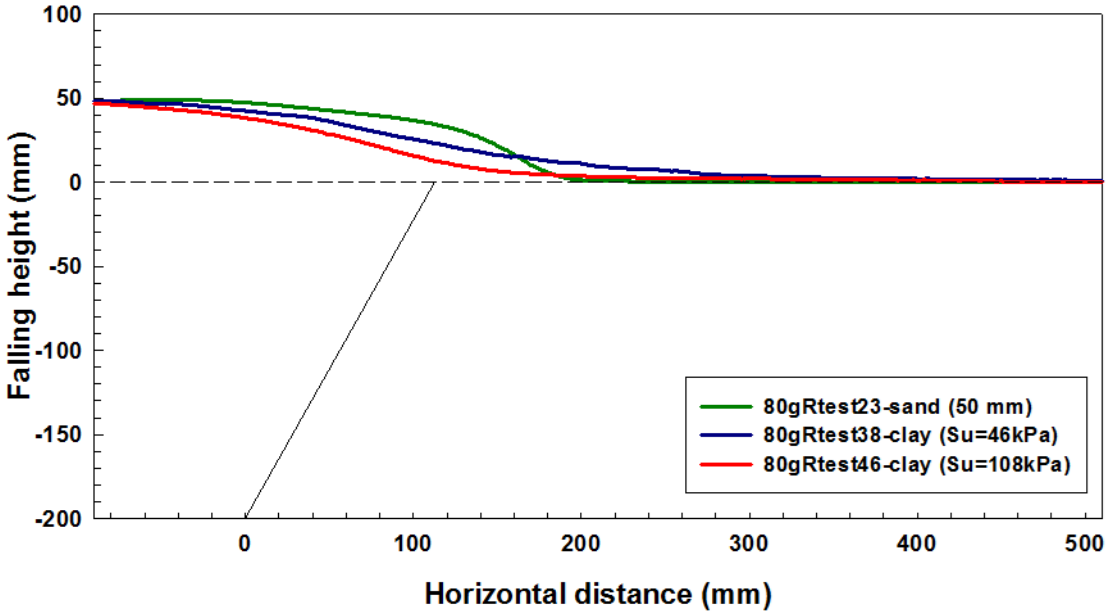


圖 3.2.18 不同剪力強度純黏土試體及砂試體逆斷層錯動試驗，地表剖面結果比較

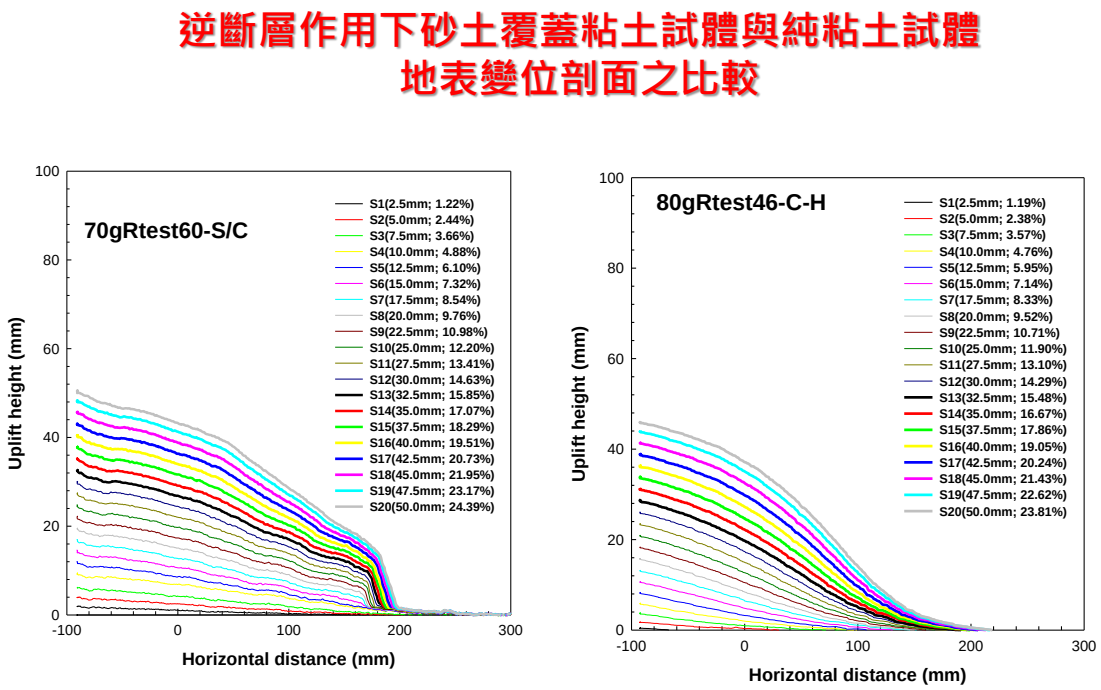


圖 3.2.19 黏土及砂土覆蓋黏土之互層試體(su =100 kPa)，逆斷層錯動試驗，地表變形高程剖面

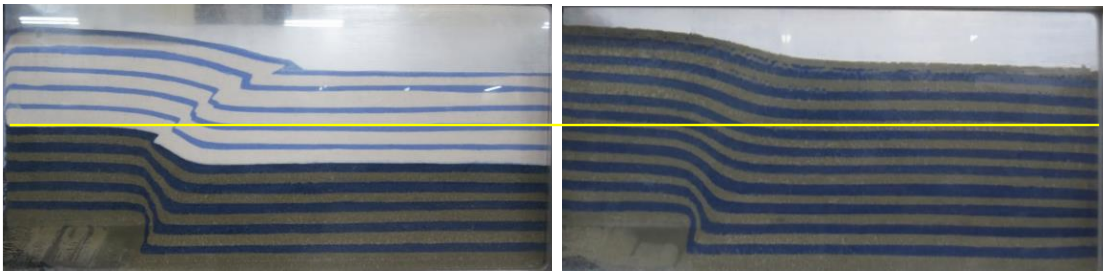


圖 3.2.20 黏土及砂土互層試體，逆斷層錯動試驗，砂及黏土界面之地下破裂跡發展之比較

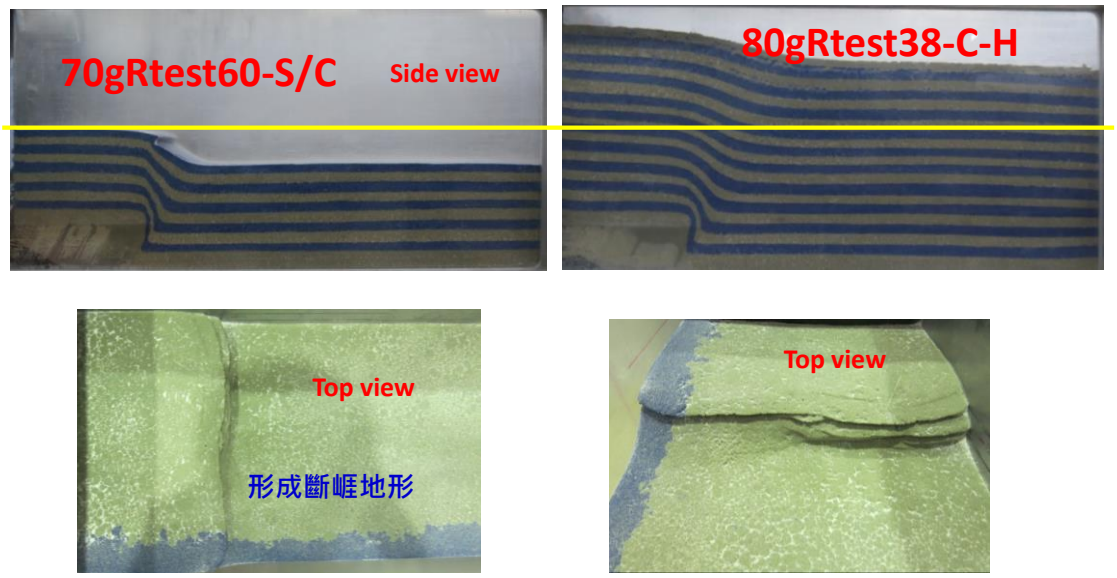


圖 3.2.21 砂土覆蓋黏土之互層試體，逆斷層錯動試驗，砂及黏土界面之變形剖面照片

逆斷層作用下砂土覆蓋粘土試體
粘土層頂部高程剖面的比較

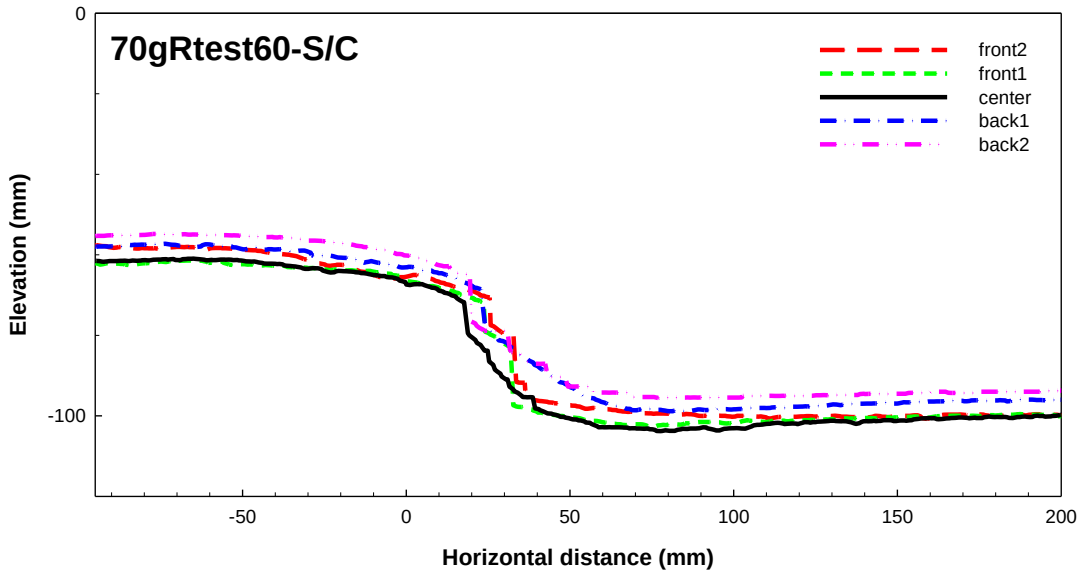
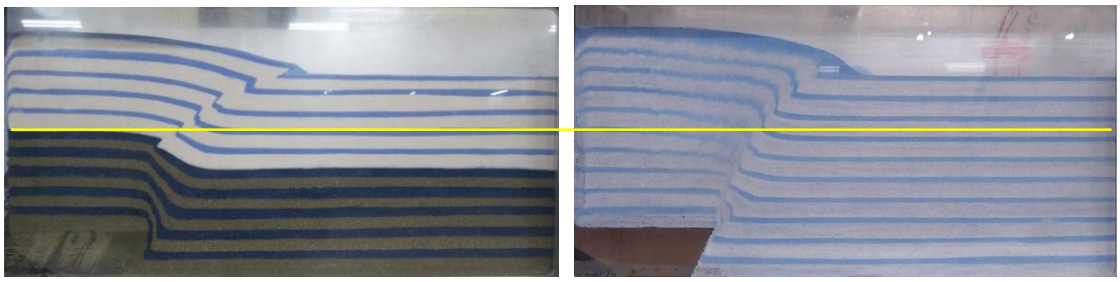


圖 3.2.22 黏土及砂土覆蓋黏土之互層試體，逆斷層錯動試驗，砂及黏土界面之變形高程剖面

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 3.2.23 純砂土及砂土上覆黏土之互層試體，逆斷層錯動試驗，地表剖面及地下破裂跡之比較

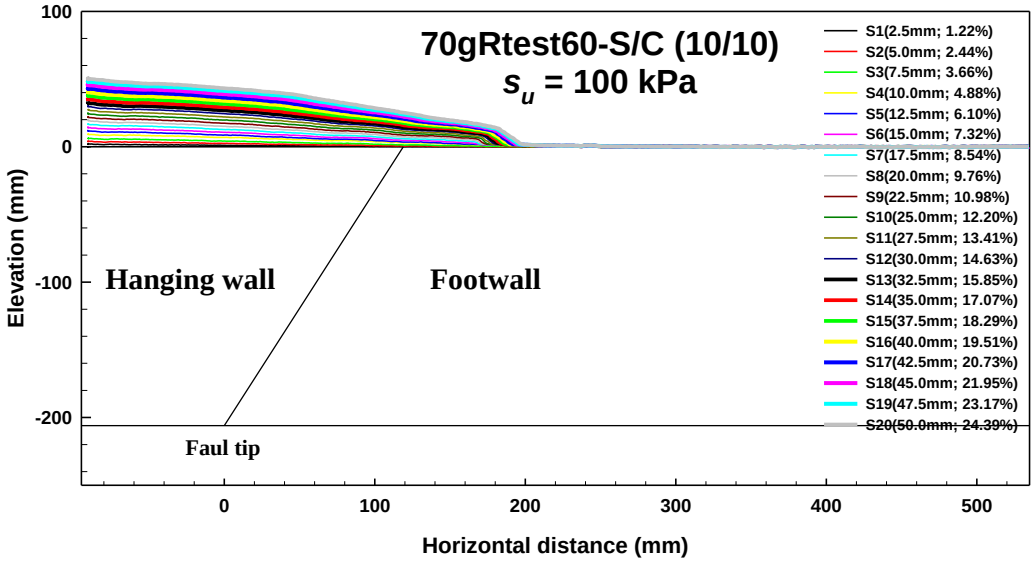


圖 3.2.24 逆斷層錯動試驗(70gRtest60-S/C (10/10)，s_u =100 kPa)，在不同垂直抬升量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度的關係

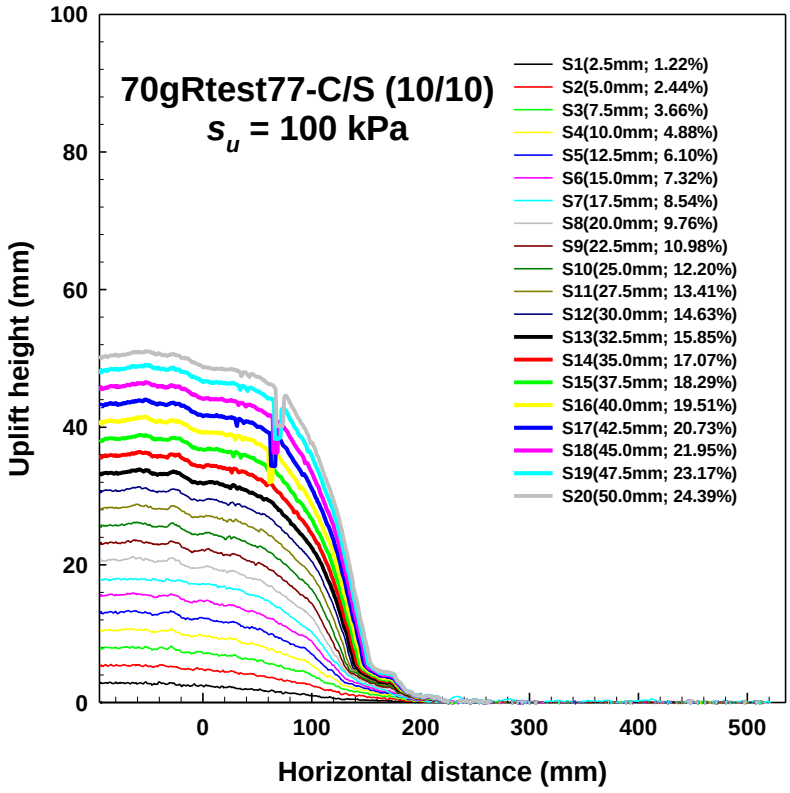


圖 3.2.25 逆斷層錯動試驗(70gRtest77- C/S (10/10)，s_u =100 kPa))，在不同垂直抬升量下的地表變位剖面

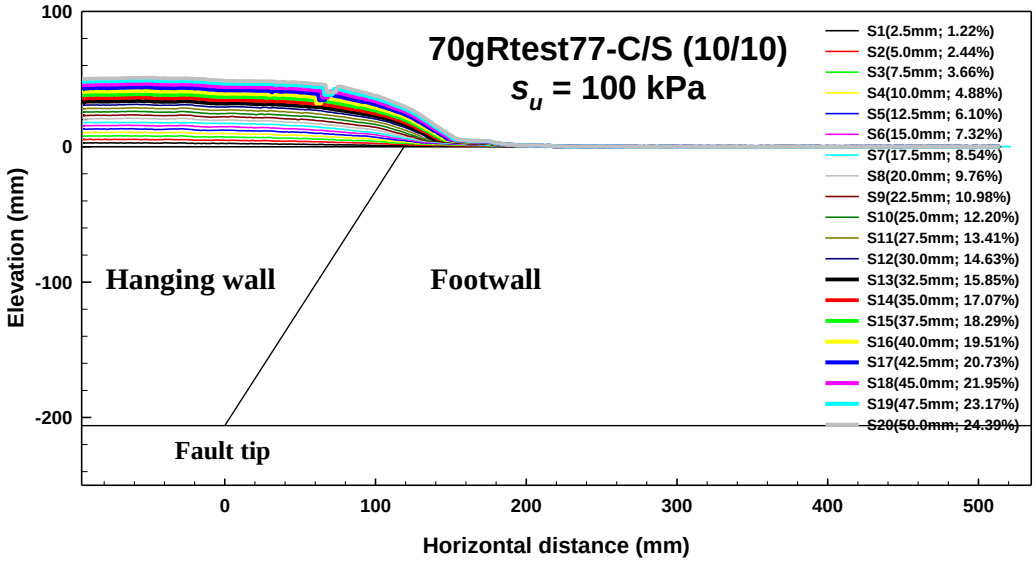


圖 3.2.26 逆斷層錯動試驗(70gRtest77- C/S (10/10)，s_u =100kPa)，在不同垂直抬升量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度的關係

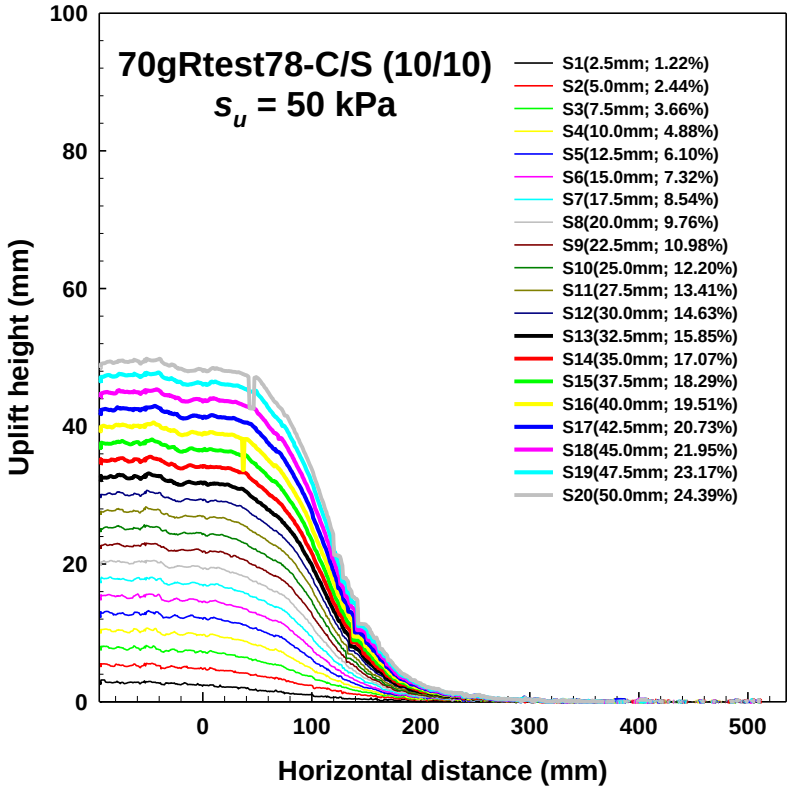


圖 3.2.27 逆斷層錯動試驗(70gRtest78- C/S (10/10)，s_u =50kPa))，在不同垂直抬升量下的地表變位剖面

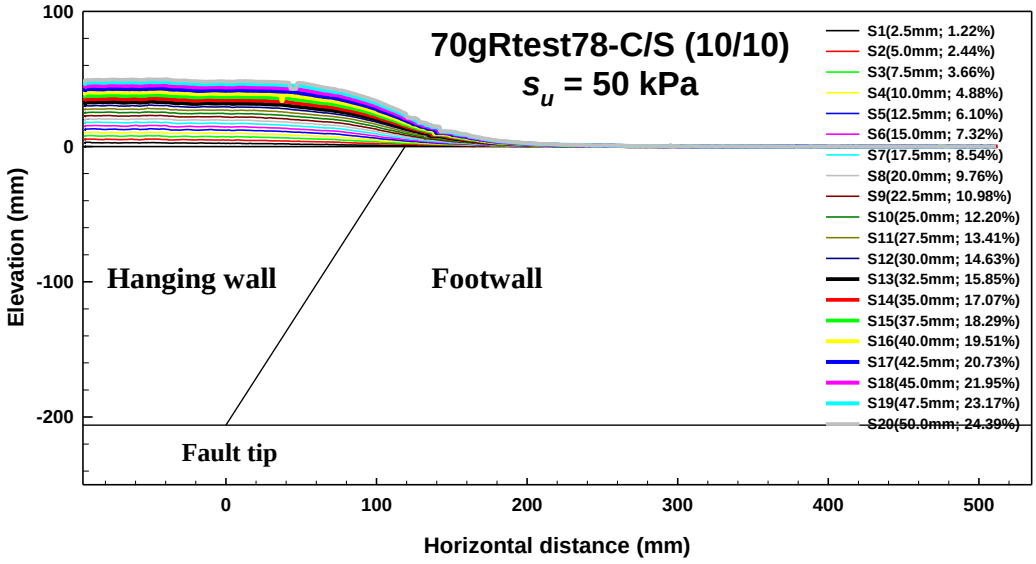


圖 3.2.28 逆斷層錯動試驗(70gRtest78-C/S (10/10)，s_u =50kPa)，在不同垂直抬升量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度的關係

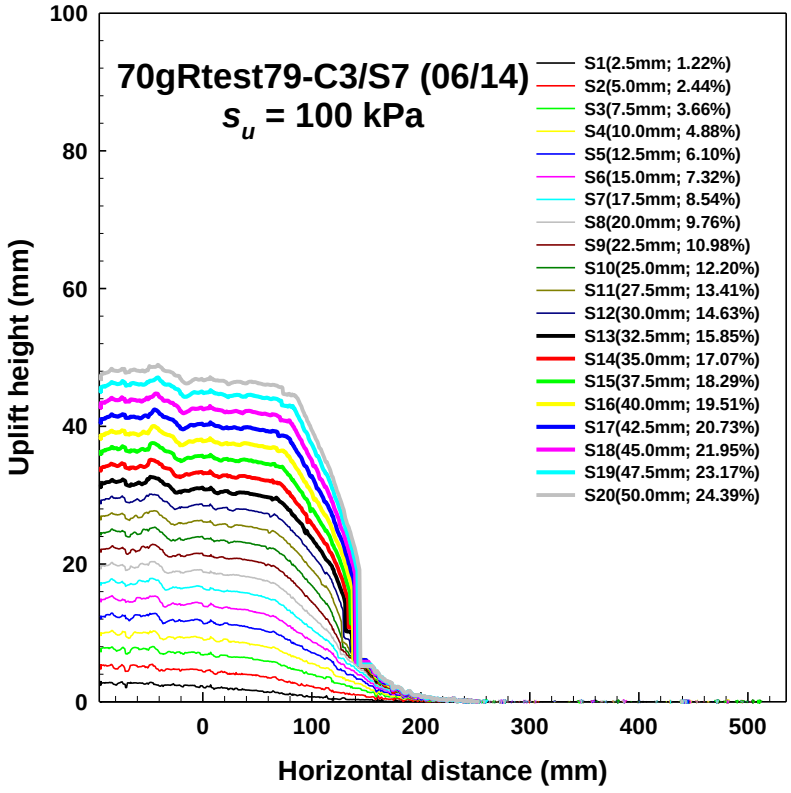


圖 3.2.29 逆斷層錯動試驗(70gRtest78-C3/S7 (06/14)，s_u =100kPa))，在不同垂直抬升量下的地表變位剖面

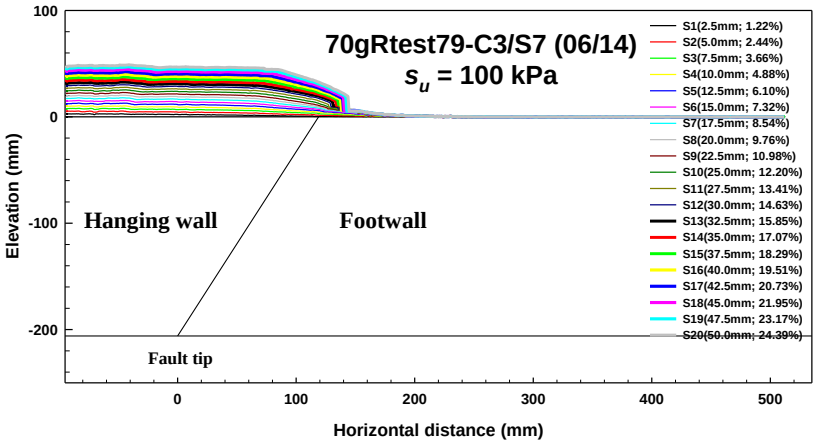


圖 3.2.30 逆斷層錯動試驗(70gRtest78-C3/S7 (06/14)，s_u =100kPa)，在不同垂直抬升量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度的關係

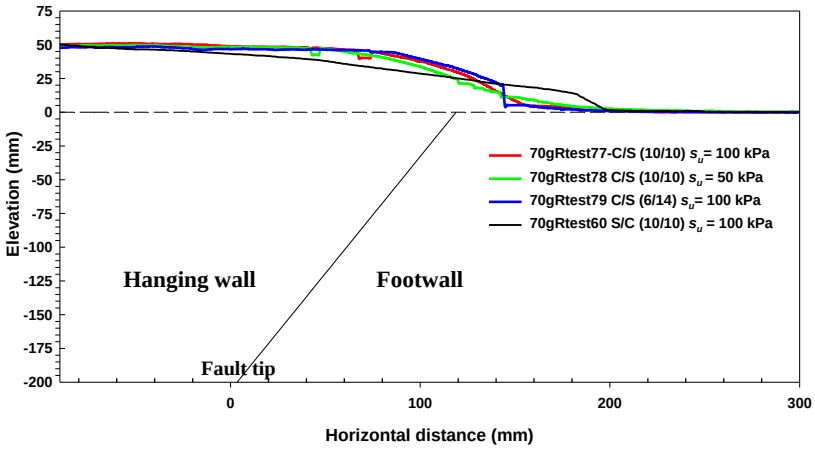


圖 3.2.31 逆斷層錯動試驗，位於不同種類的互層地盤，受到 5cm 垂直錯動量，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度的關係

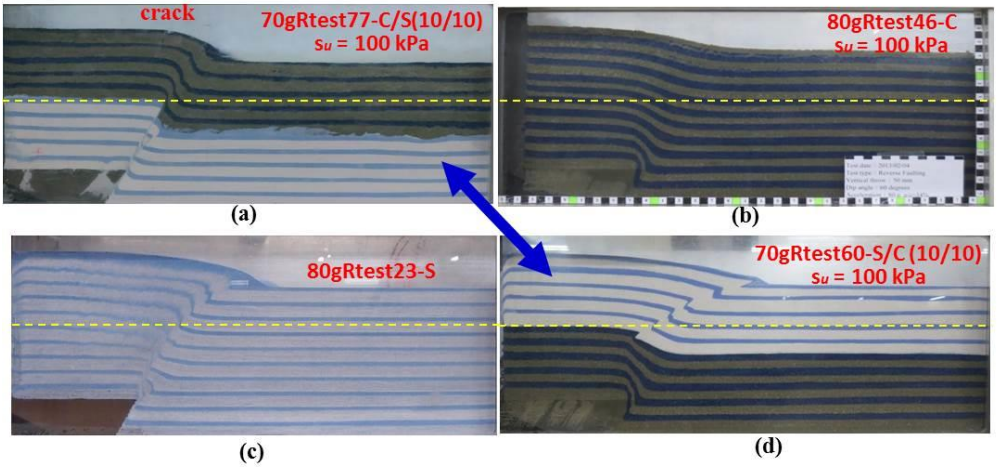


圖 3.2.32 不同土層逆斷層錯動試驗，垂直抬升量 5 cm，地下斷層跡剖面的比較。(a)70gRtest77-C/S(10/10)；(b)80gRtest46-C；(c)80gRtest23-S；(d)70gRtest60-S/C (10/10)

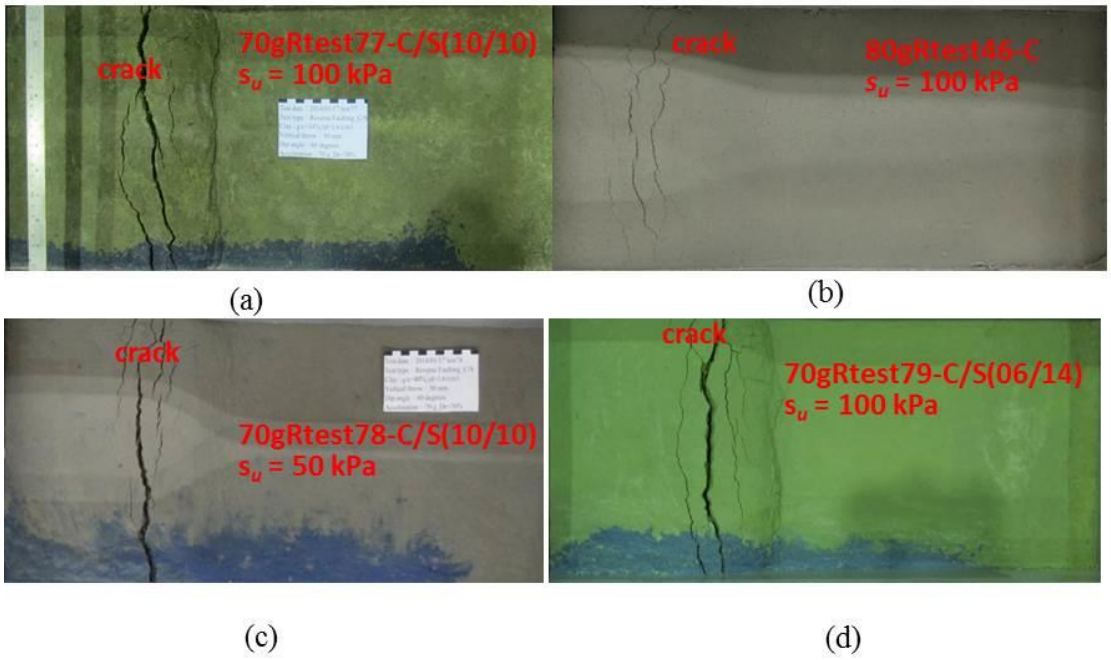


圖 3.2.33 不同互層土層逆斷層錯動試驗，垂直抬升量 5cm，地表破裂型態的比較。(a)70gRtest77-C/S (10/10)；(b)80gRtest46-C；(c)70gRtest78-C/S(10/10)；(d) 70gRtest79-C/S (06/14)

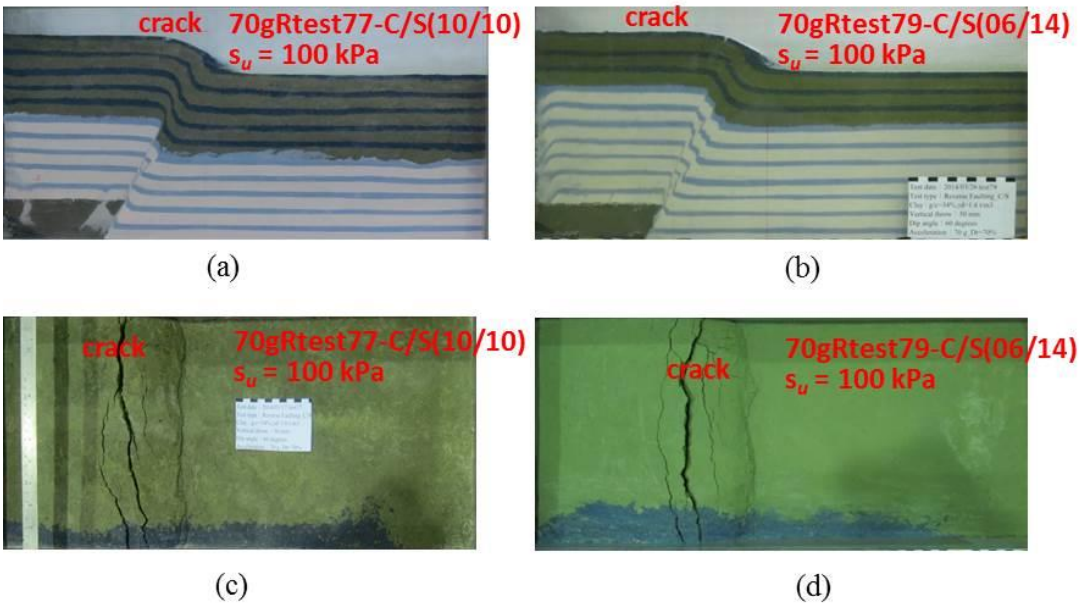
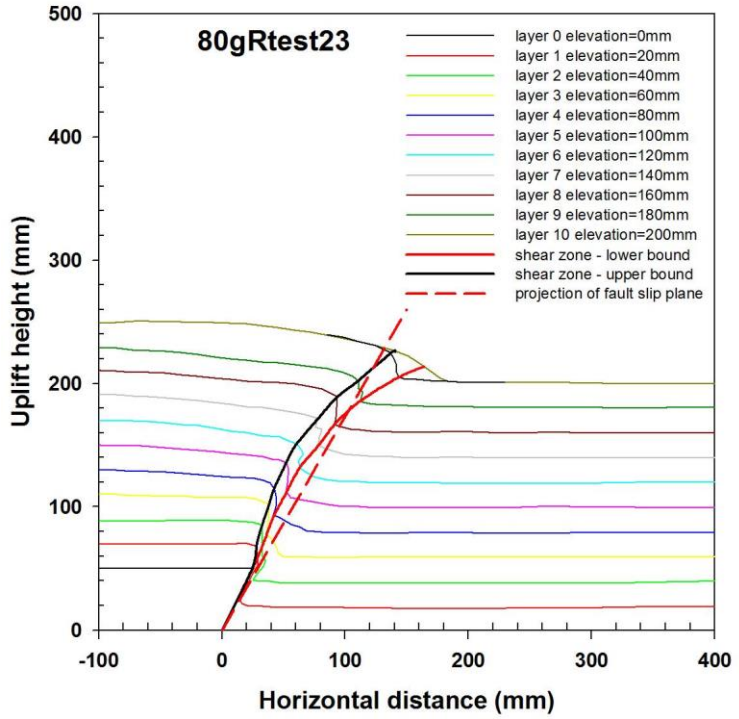
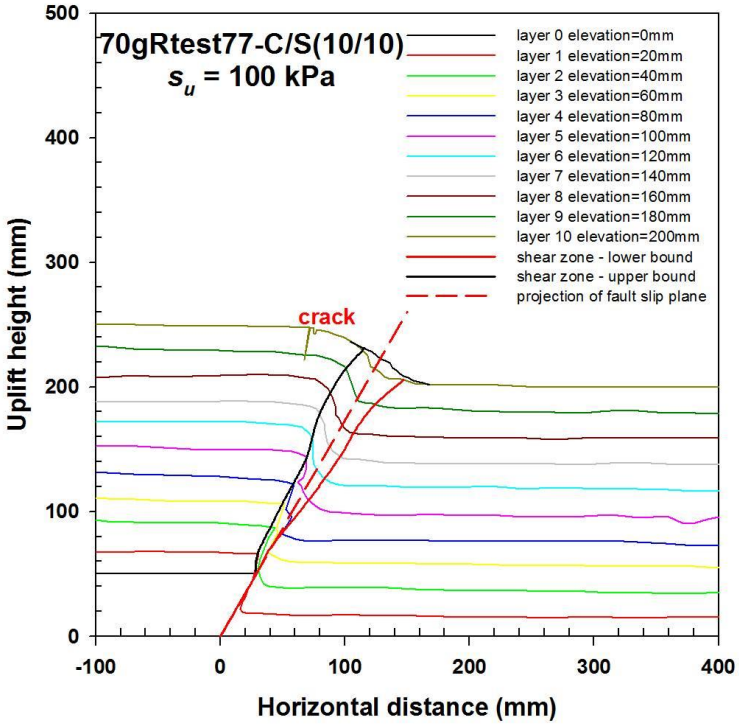


圖 3.2.34 不同黏土層厚度的互層土層逆斷層錯動試驗，垂直抬升量 5cm，地表破裂型態及地下斷層跡剖面的比較。(a)70gRtest77-C/S (10/10)；(b)70gRtest79-C/S (06/14)；(c)70gRtest77-C/S(10/10)；(d)70gRtest79-C/S (06/14)

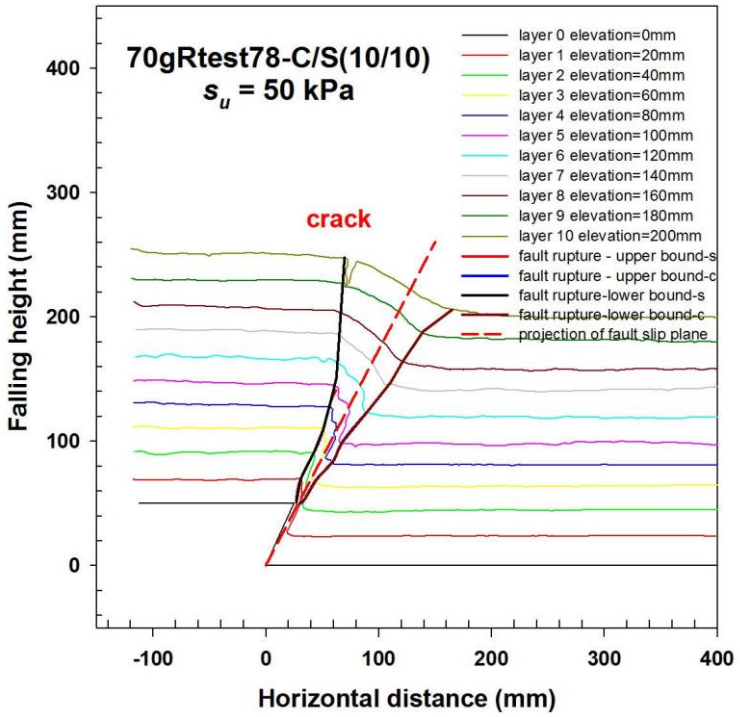


(a)

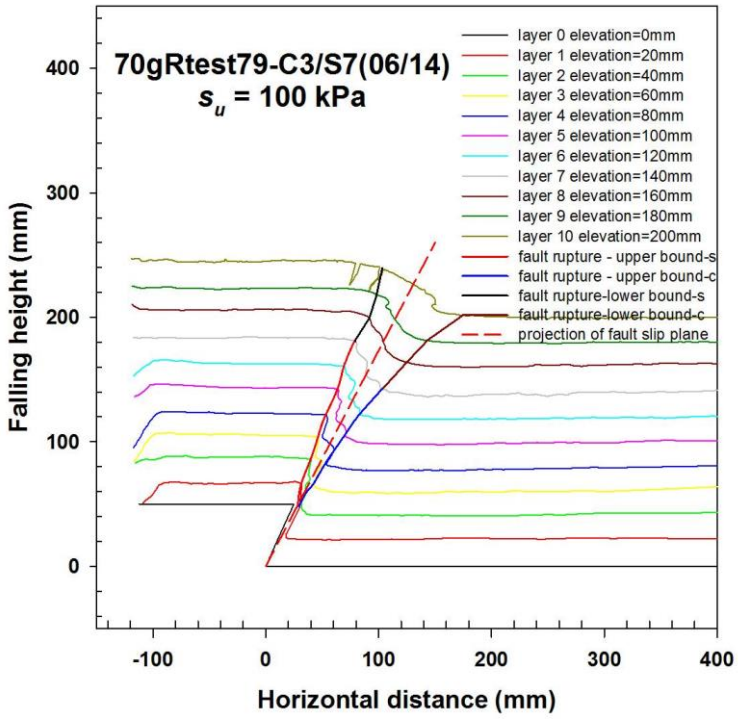


(b)

圖 3.2.35 不同互層土層逆斷層錯動試驗，地下斷層跡剖面的比較。(a)80gRtest23；(b)70gRtest77-C/S (10/10) s_u = 100 kPa



(a)



(b)

圖 3.2.36 不同互層土層逆斷層錯動試驗，地下斷層跡剖面的比較。

(a)70gRtest78-C/S (10/10) s_u = 50kPa；(b)70gRtest79-C3/S7 (06/14) s_u = 100kPa

3.3 正斷層離心模型試驗的試驗成果

3.3.1 覆土層為砂土之試驗成果

利用掃瞄台車在正斷層砂試體陷落過程中，進行正斷層地表剖面掃瞄，可以有效掌握在不同正斷層垂直錯動量下，地表陷落剖面的變化。圖 3.3.1(80gNtest24，Dr=70%)為在 80g 的試驗條件下，正斷層錯動陷落試驗，在不同垂直陷落量下的地表變形剖面曲線。圖中橫座標代表水平距離，而水平距離 0 處，代表斷層尖端所處初始位置；縱座標則代表地表陷落高度。圖 3.3.2 (80gNtest24，Dr=70%)則可以顯示斷層錯動角度及初始位置與地表變形剖面之對應關係。圖中橫座標亦代表水平距離，水平距離 0 處，代表斷層尖端所處初始位置；縱座標則代表地表高程，縱座標 0 代表地表陷落前之高程。圖 3. 3.3(40gNtest26，Dr=70%)及圖 3. 3.4(40gNtest30，Dr=70%)為在 40g 的試驗條件下，正斷層錯動陷落試驗，在不同垂直陷落量下的地表變形剖面曲線。圖 3. 3.5(40gNtest26，Dr=70%)及圖 3. 3.6(40gNtest30，Dr=70%)則可以顯示斷層錯動角度及位置與地表變形剖面之對應關係。圖 3. 3.7(1gNtest31，Dr=70%)為在 1g 的試驗條件下，正斷層錯動陷落試驗，在不同垂直陷落量下的地表變形剖面曲線。圖 3. 3.8(1gNtest31，Dr=70%)則可以顯示斷層錯動角度及位置與地表變形剖面之對應關係。這八個圖顯示隨著正斷層垂直陷落量的增加，正斷層錯動所形成的邊坡高度及邊坡角度逐漸增加，當垂直陷落量約為覆土層厚度的 6.25%時，會形成兩個不同邊坡角的邊坡，近地表(約 2 cm 深)有較陡的邊坡坡角，然後接續一個較緩的邊坡；隨著垂直陷落量繼續增加(邊坡高度繼續增加)，較緩的邊坡逐漸向前崩落及堆積，成為單一較平緩的邊坡，而正斷層出露地表位置，亦逐漸向後延伸，最後形成約 27 度的緩坡。圖 3.3.9 顯示在愈高 g 的試驗條件下進行正斷層試驗，斷層出沒地表的位置愈遠，愈往上盤移動，也形成較緩的邊坡。陷落最深處，大約出現在水平距離 0 處(斷層尖端所處位置)，然後向下降側(上盤)緩升。

圖 3.3.10 至圖 3.3.13 分別為 80gNtest24、40gNtest30、40gNtest26、1gNtest31 砂土試體正斷層試驗，在不同陷落高度時，正規化水平距離與正規化陷落高度之地表剖面圖。圖中顯示下盤正斷層陷落變形範圍約為約為上覆土層厚度的 0.8 倍。

在高 g 的試驗條件時，在較小的垂直陷落量，有較大的正規化地表陷落量(>1.3)，最大地表陷落量出現在斷層尖端處；隨著垂直陷落量增加，正規化地表陷落量逐漸減少至 1.2；但 1g 的試驗隨著垂直陷落量的增加，而逐漸增加而達到 1.4。地表最大陷落深度較正斷層基盤陷落深度大(正規化地表陷落量大約等於 1.2)，主要原因為當基盤沿著 60 度陷落時，多出如圖 3. 3.14 的黃色體積部分，需要由上覆土層來填補，因此導致在斷層尖端處，會有最大的地表陷落量，高 g 的正斷層試驗，形成較緩的邊坡，意味著有較多的砂土崩落來填補，因此有較少的地表陷落量。此地表陷落量會隨著距斷層尖端的距離愈遠而逐漸減少，並趨近於斷層的陷落量(正規化陷落量趨近 1)；此影響範圍約為上覆土層厚度的 0.6 倍。而此範圍的地中應力將急速降低，甚至產生張應力。最大陷落量的大小與上覆土層的剪力強度有關，較高的剪力強度的覆土層，會發生較陡的邊坡，減少邊坡的崩落，因此會有較大的最大地表陷落量。雖然由前面的試驗成果發現，地表變形陷落剖面並不隨著試驗 g 值的不同，而有太大的不同，但圖中顯示在低 g 值的試驗條件下，陷落土層形成的邊坡較陡；在高 g 的試驗條件，陷落土層形成的邊坡較緩。最主要的原因可能是在高 g 情況下，砂土的膨脹角受到高覆土應力的抑制，不容易發展成較陡的邊坡，而有較大的崩落量，因而形成較平緩的邊坡，有較多崩落的砂土堆積於坡腳，也造成有較小的最大陷落量。因此 1g 的試驗(1gNtest31)有較大的斷層陷落量(1.4) 。從理論上推測較平緩的斷層角(小於 60 度的斷層角)，在相同的垂直陷落量時，如圖 3. 3.14 的黃色體積部分也會較大，因此地表最大垂直陷落量也會較大，影響範圍也會較廣。另外由於此部分的陷落量，也會同時導致反向斷層的出現，可以預期當斷層角度愈小，反向斷層的出現也將會愈明顯。

圖 3. 3.15、圖 3. 3.16 及圖 3. 3.17 分別為正斷層錯動陷落試驗，在不同 g 值試驗條件下，垂直陷落動距離(50mm; 25%)的斷層側視剖面。雖然由前面的試驗成果討論可以發現，地表變形剖面並不隨著試驗 g 值的不同，而有太大的不同，但圖中顯示在低 g 值的試驗條件，上盤土層有較明顯的陷落及摺皺現象，染色的砂土層也有較大的增厚現象；在高 g 的試驗條件，上述現象受到壓抑，最主要的

原因可能是在高g情況下,砂土的膨脹角受到較高覆土應力的抑制,不容易發展。另外在 1g 情況下，砂土存在微小的毛細壓力，造成有效應力增加；但在高 g 的試驗條件，毛細壓力的影響就微不足道了。

3.3.2 覆土層為黏土之試驗成果

本試驗的人工黏土採用含甘油量為 40%來拌和朋脫土,利用分層靜壓方式，來準備黏土試體。人工黏土試體厚度約 22cm，單位重為 16.7kN/m^3。利用十字片剪剪力試驗來求取不排水剪力強度，s_u，隨深度變化情形。

圖 3.3.18(40gNtest32-C)及圖 3.3.20(50gNtest36-C)為正斷層錯動試驗,在不同垂直陷落量下的地表變位剖面；而圖 3.3.19(40gNtest32-C) 及圖 3.3.21 (50gNtest36-C)則為正斷層錯動試驗。在不同垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係。相較於砂土試體，在目前黏土的剪力強度下，陷落的範圍較為寬廣，約為覆土層厚度的 1.9 倍，但地表剖面的坡度相對於砂土試體的坡度較為緩和。另外圖 3.3.22(40gNtest32-C)及圖 3.3.23(50gNtest36-C)分別為正斷層錯動試驗，試驗前及試驗後(垂直陷落量=5cm)，地表裂縫及側視圖。大約在垂直陷落量 1%，第一條裂縫開始出現，隨著陷落量的增加，地表裂縫的條數及寬度、深度亦逐漸增加。

圖 3.3.24 和圖 3.3.25 以及圖 3.3.26 為具有不同剪力強度的純黏土試體(80gNtest37-C 及 80gNtest44-C-H)，正斷層錯動後地表剖面形狀、張裂縫位置、深度及範圍結果之比較。純黏土試體，隨著剪力強度的增加，地表變形的影響範圍則變小，但地表張裂縫的深度則增加，而張裂縫數量則減少。圖 3.3.27 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，張裂縫的深度增加，但數量則減少。

3.3.3 覆土層為黏土與砂土互層之試驗成果

本節針對砂土層覆蓋黏土層或黏土層覆蓋砂土層的兩種不同型式的互層地盤，進行正斷層錯動離心模型試驗。探討此兩種互層地盤受到正斷層錯動後，地表變形剖面的演化，並進行相互比較。本研究利用砂土上覆黏土層(S/C)或黏土

上覆砂土層(C/S)兩種互層地盤，進行正斷層錯動試驗，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 3.3.28 及圖 3.3.29 分別為正斷層錯動試驗(70gNtest80-S/C (10/10)，su = 100kPa)，在不同垂直陷落量的地表變位剖面以及在不同垂直陷落量(0 – 5 cm)，地表變位剖面與正斷層位置及斷層角度的關係。試驗編號的 S/C (10/10)，su =100 kPa，代表該試驗的互層地盤為 10 cm 的砂土層，覆蓋在 10 cm 的黏土層上面，而黏土層的剪力強度為 100 kPa。圖 3.3.30 及圖 3.3.31 分別為正斷層錯動試驗(70gNtest81-S/C (06/14)，su =100kPa)，在不同垂直陷落量的地表變位剖面以及在不同垂直陷落量(0 – 5 cm)，地表變位剖面與正斷層位置及斷層角度的關係。上覆較薄黏土層的試體，產生較深單階的垂直陷落量；較厚的黏土層，則產生雙階且較淺的陷落量。圖 3.3.32 及圖 3.3.33 分別為正斷層錯動試驗(70gNtest82 -S/C (10/10)，su = 50kPa)，在不同垂直陷落量的地表變位剖面以及在不同垂直陷落量(0 – 5cm)，地表變位剖面與正斷層位置及斷層角度的關係。試驗結果顯示張力裂縫發生的位置相較剪力強度較高的試體，較接近正斷層尖端延伸至地表的位置，而且張力裂縫深度也較淺。而圖 3.3.34 為正斷層錯動試驗，不同種類的互層地盤，在 5cm 的陷落量下，地表變位剖面之比較。在相同的黏土強度上覆黏土層厚度為 6cm，張力裂縫會貫穿整個黏土層。圖 3.3.35 不同土層正斷層錯動試驗，垂直陷落量 5cm，地表斷層跡的比較；圖 3.3.36 為不同互層土壤正斷層錯動試驗，垂直陷落量 5cm，地下斷層跡剖面的比較；圖 3.3.37 為不同互層土壤正斷層錯動試驗，垂直陷落量 5cm，地表斷層跡的比較。圖 3.3.38 正斷層錯動試驗，位於不同種類的互層地盤，受到 5cm 垂直陷落量，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度的關係及比較，圖中顯示 70gNtest80 土壤強度較高，地表裂縫較窄，發生地表斷層裂縫處較遠離斷層跡出露地表，黏土層厚度較薄者，垂直裂縫較深，土壤強度較低者，斷層地表影響範圍較寬，且地表斷層裂縫處較接近斷層跡出露地表處。

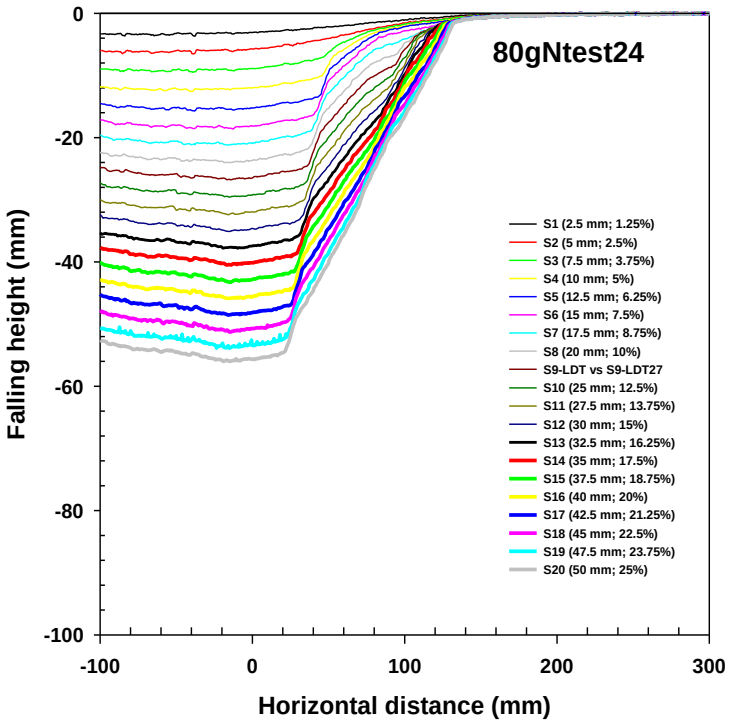


圖 3.3.1 正斷層錯動試驗(80gNtest24，Dr=70%)，在不同垂直陷落量下的地表變位剖面

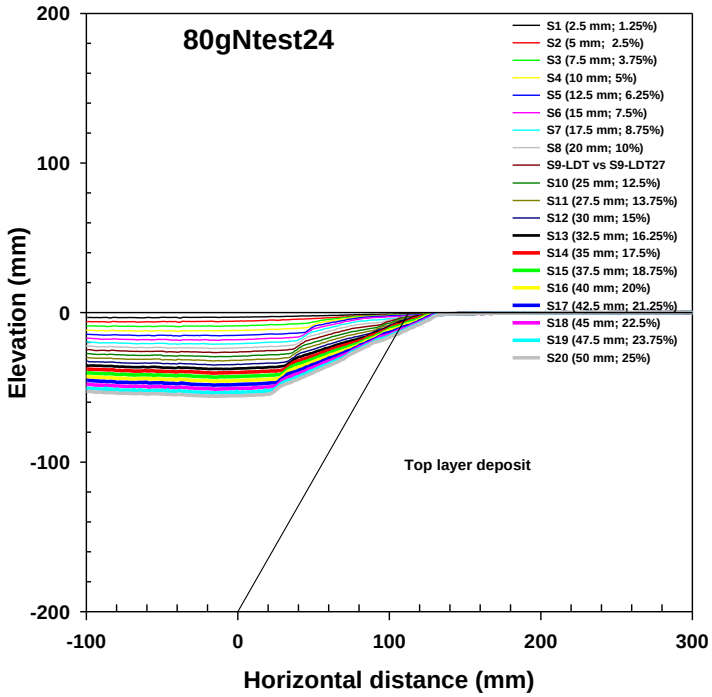


圖 3.3.2 正斷層錯動試驗(80gNtest24)，在不同垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係

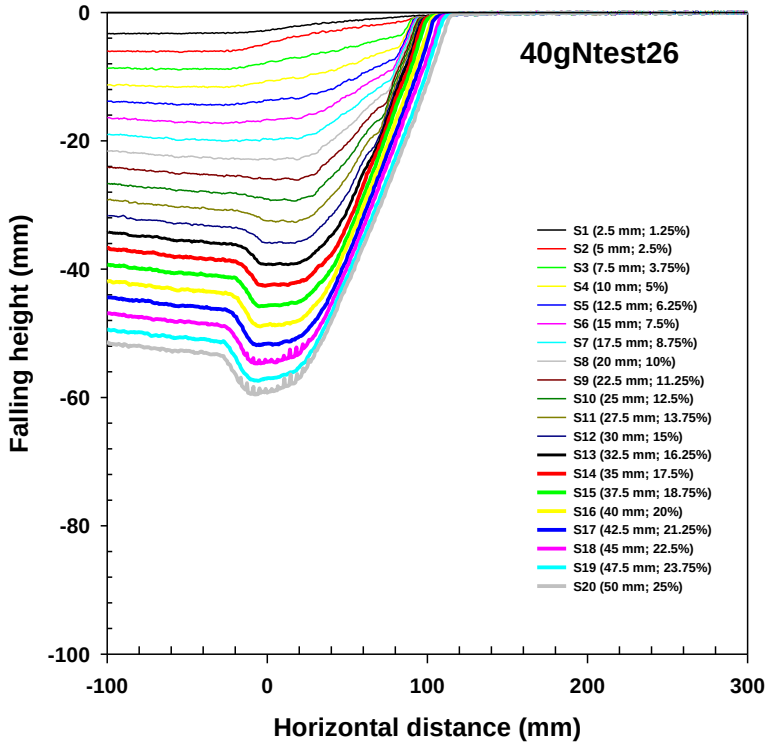


圖 3.3.3 正斷層錯動試驗(40gNtest26，Dr=70%)，在不同垂直陷落量下的地表變位剖面

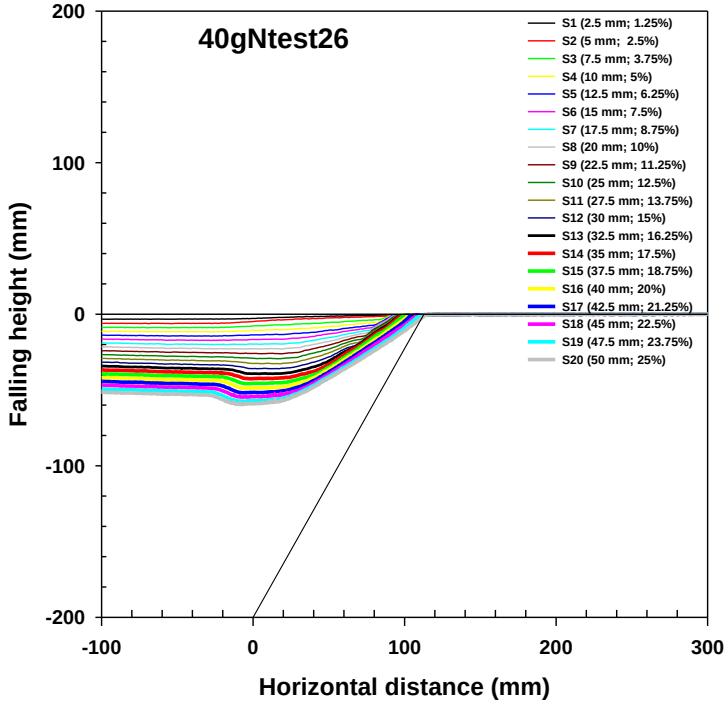


圖 3.3.4 正斷層錯動試驗(40gNtest26，Dr=70%)，在不同垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係

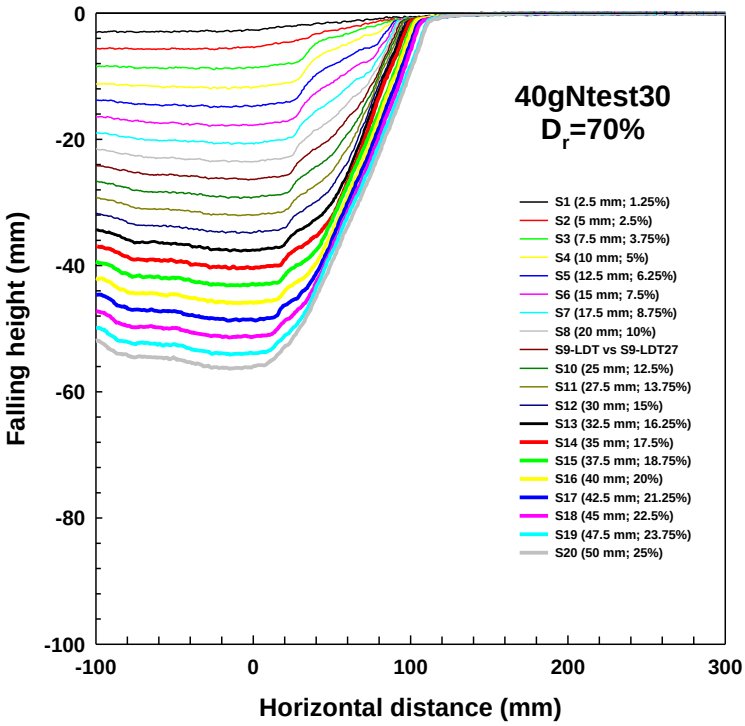


圖 3.3.5 正斷層錯動試驗(40gNtest30，Dr=70%)，在不同垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係

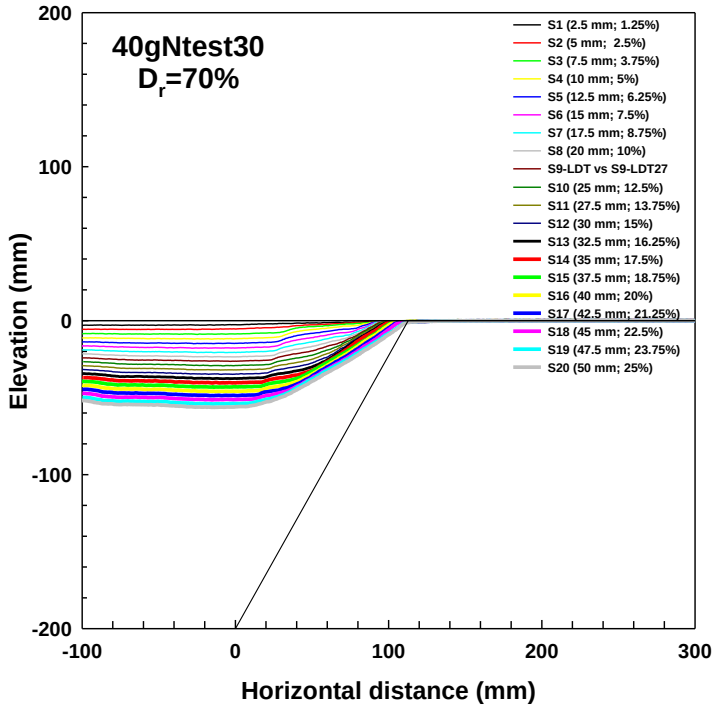


圖 3.3.6 正斷層錯動試驗(40gNtest30，Dr=70%)，在不同垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係

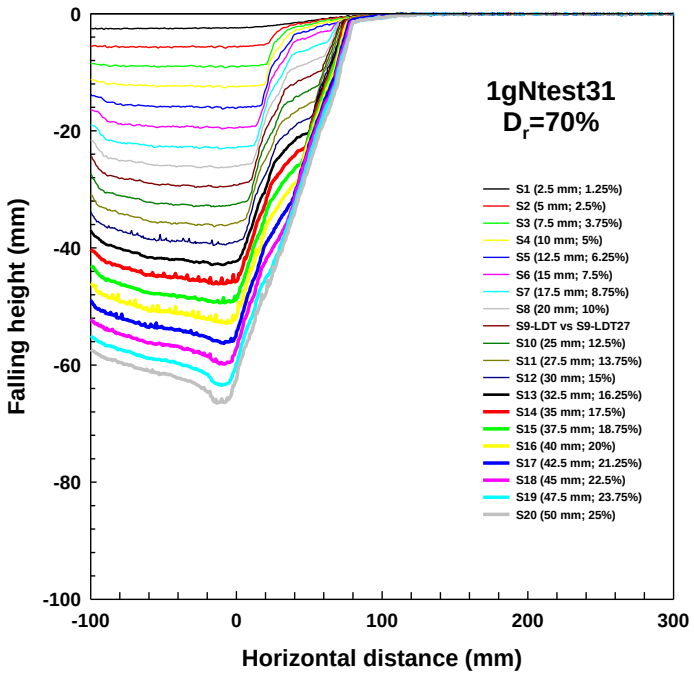


圖 3.3.7 正斷層錯動試驗(1gNtest31，Dr=70%) ，在不同垂直陷落量下的地表變位剖面

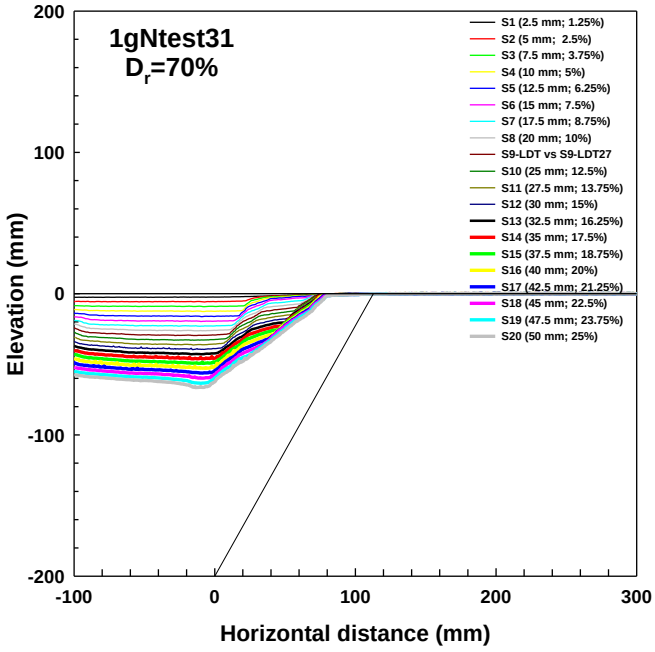


圖 3.3.8 正斷層錯動試驗(1gNtest31，Dr=70%)，在不同垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係

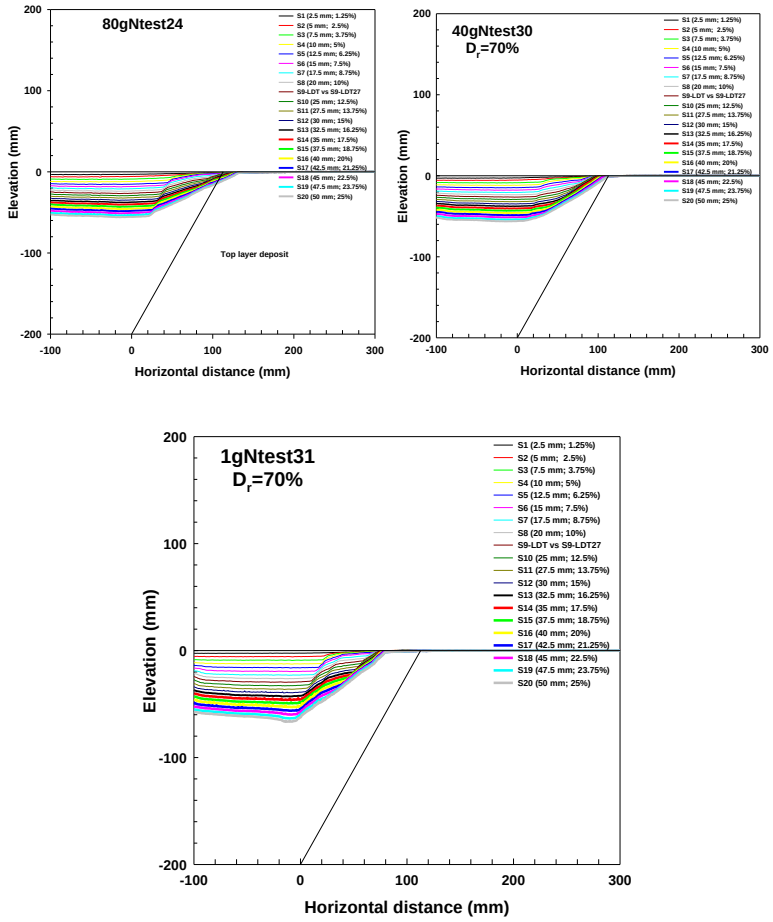


圖 3.3.9 正斷層錯動試驗，在不同 g 值及垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係

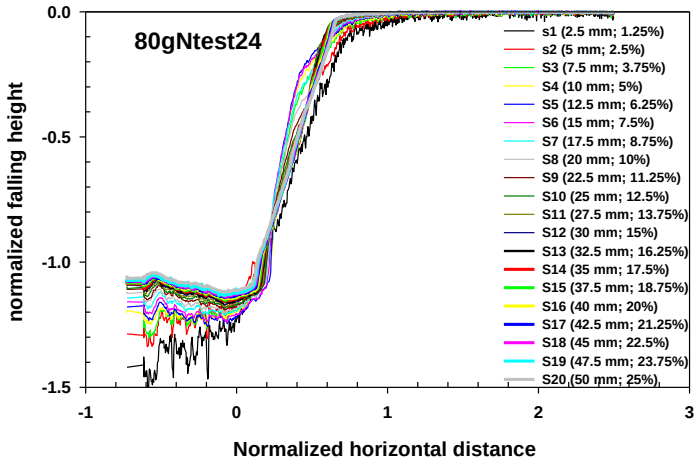


圖 3.3.10 正斷層錯動試驗(80gNtest24)，在不同垂直陷落量下，正規化地表變位剖面與正規化水平距離關係

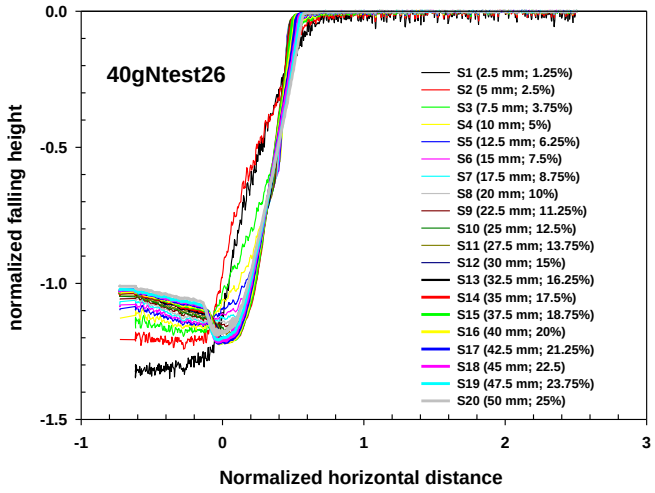


圖 3.3.11 正斷層錯動試驗(40gNtest26)，在不同垂直陷落量下，正規化地表變位剖面與正規化水平距離關係

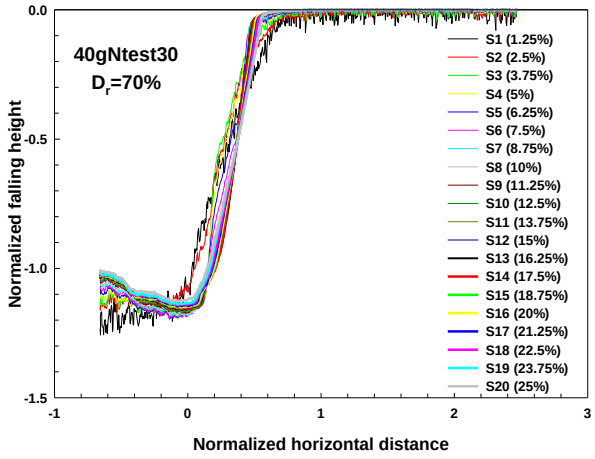


圖 3.3.12 正斷層錯動試驗(40gNtest30)，在不同垂直陷落量下，正規化地表變位剖面與正規化水平距離關係

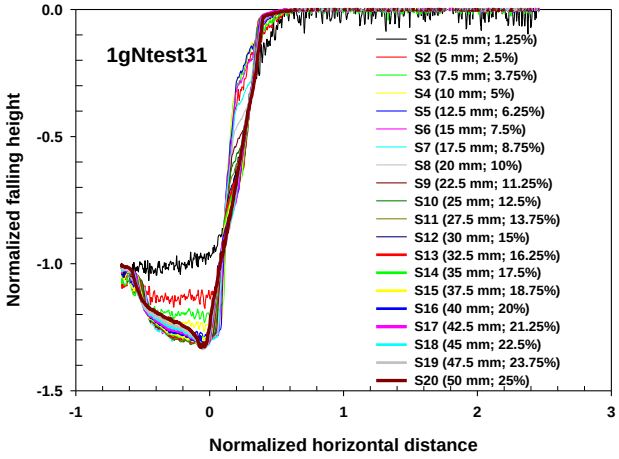


圖 3.3.13 正斷層錯動試驗(1gNtest31)，在不同垂直陷落量下，正規化地表變位剖面與正規化水平距離關係

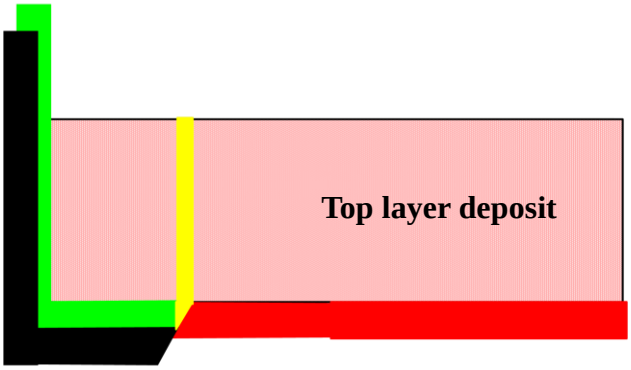


圖 3.3.14 正斷層錯動時上覆土層體積的變化關係

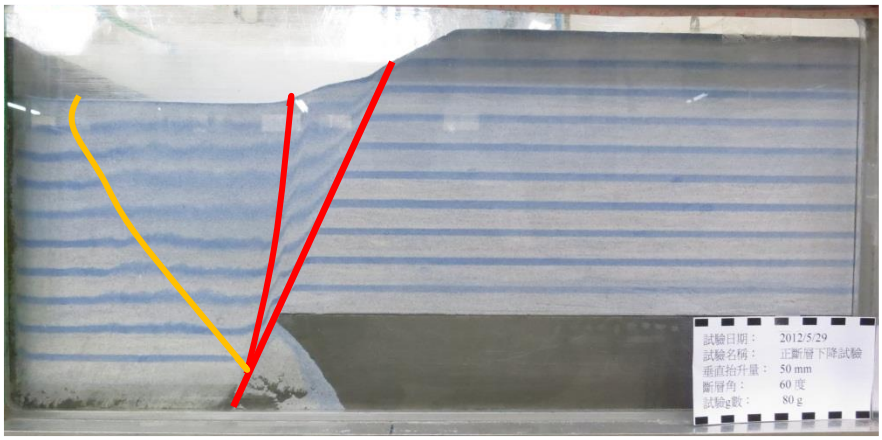


圖 3.3.15 正斷層錯動陷落試驗在 80g 試驗條件下，垂直陷落距離(50mm; 25%)的斷層側剖面(80gNtest24)

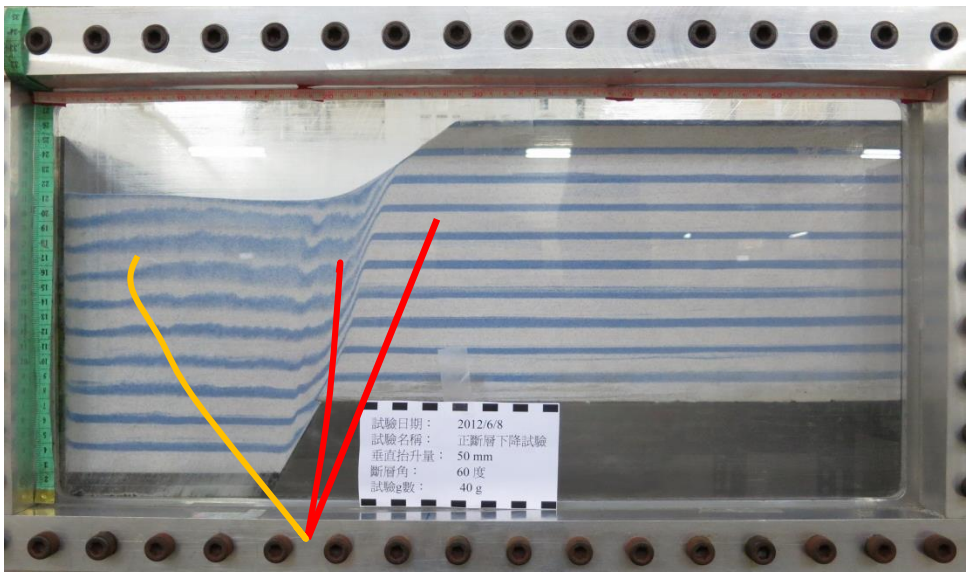


圖 3.3.16 正斷層錯動試驗在 40g 試驗條件下，垂直陷落距離(50mm; 25%)的斷層側剖面(40gNtest26)

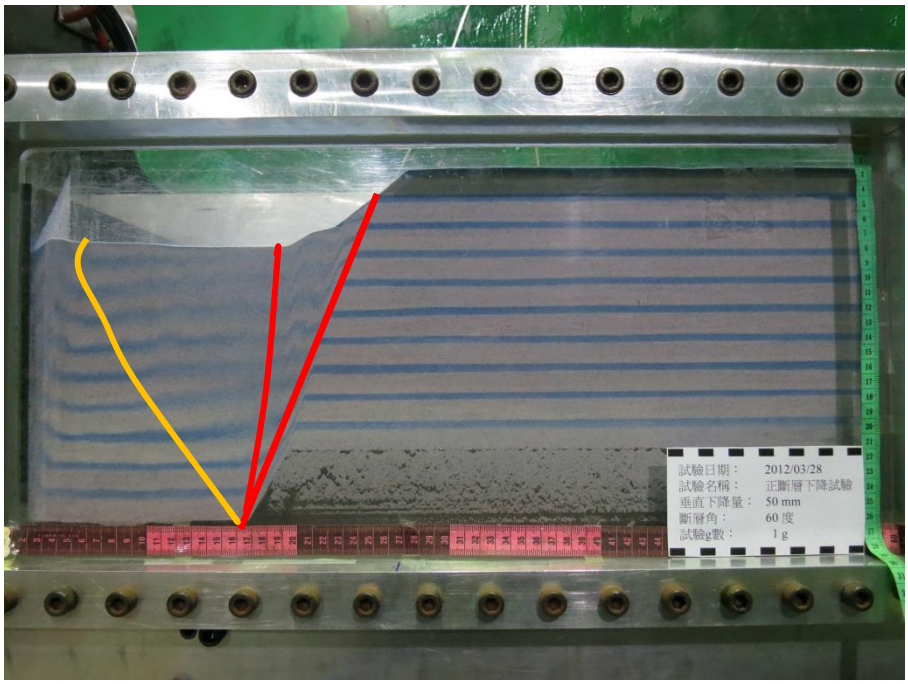


圖 3.3.17 正斷層錯動試驗在 1g 試驗條件下，垂直陷落距離(50mm; 25%)的斷層側剖面(1gNtest18)

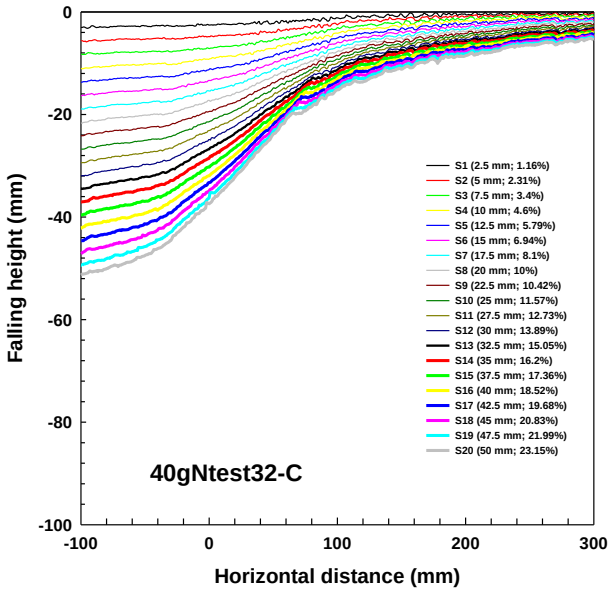


圖 3.3.18 正斷層錯動試驗(40gNtest32-C) ，在不同垂直陷落量下的地表變位剖面

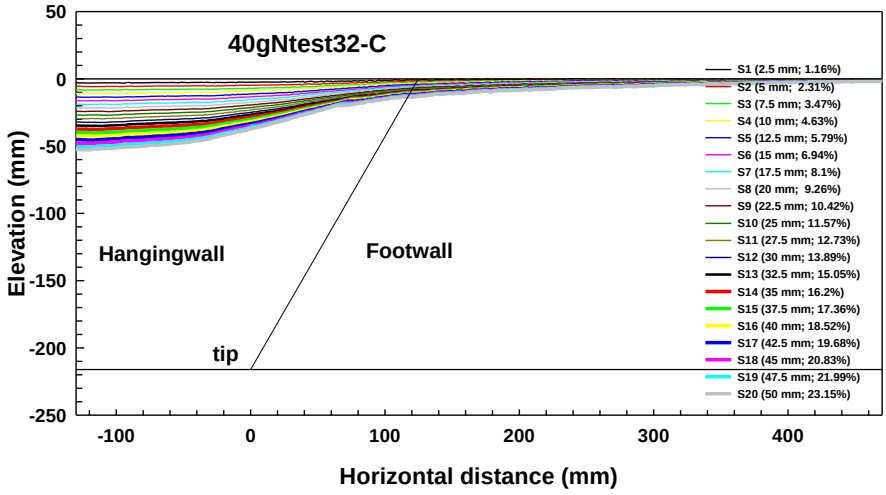


圖 3.3.19 正斷層錯動試驗(40gNtest32-C)，在不同垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係

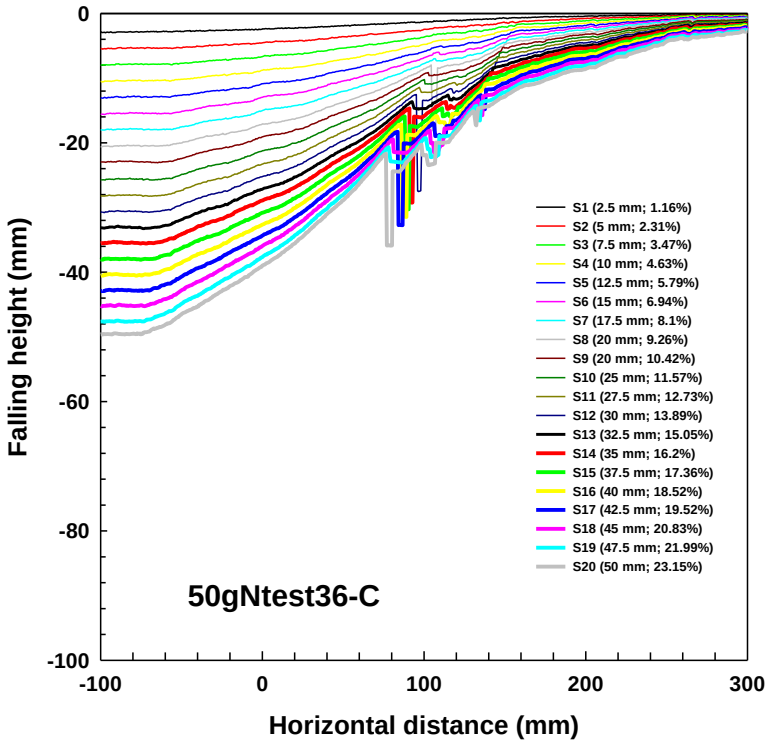


圖 3.3.20 正斷層錯動試驗(50gNtest36-C) ，在不同垂直陷落量下的地表變位剖面

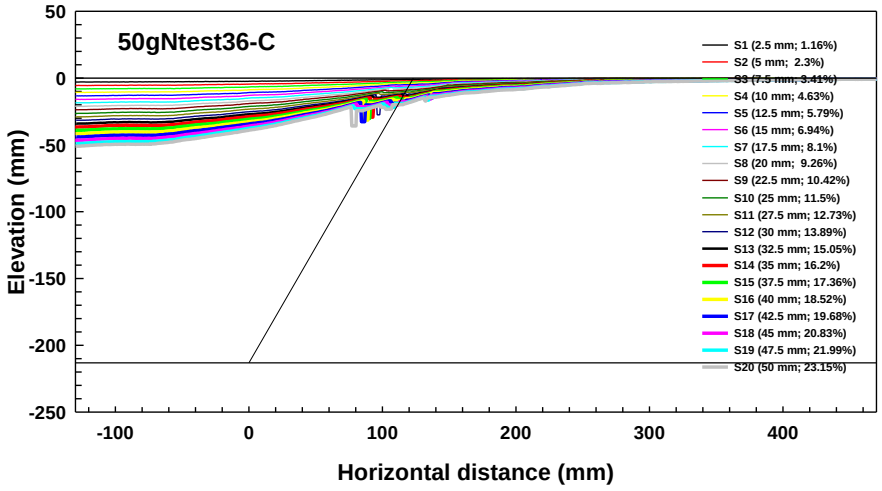


圖 3.3.21 正斷層錯動試驗(50gNtest36-C)，在不同垂直陷落量下，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度關係

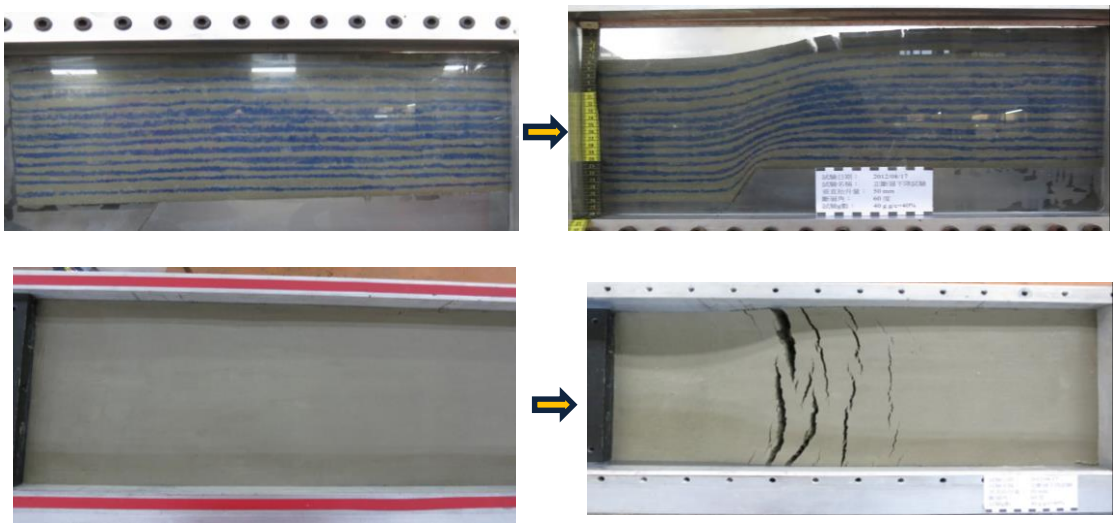


圖 3.3.22 正斷層試驗(40gNtest32-C)，試驗前後(Δh=5cm)，地表裂縫及側視圖

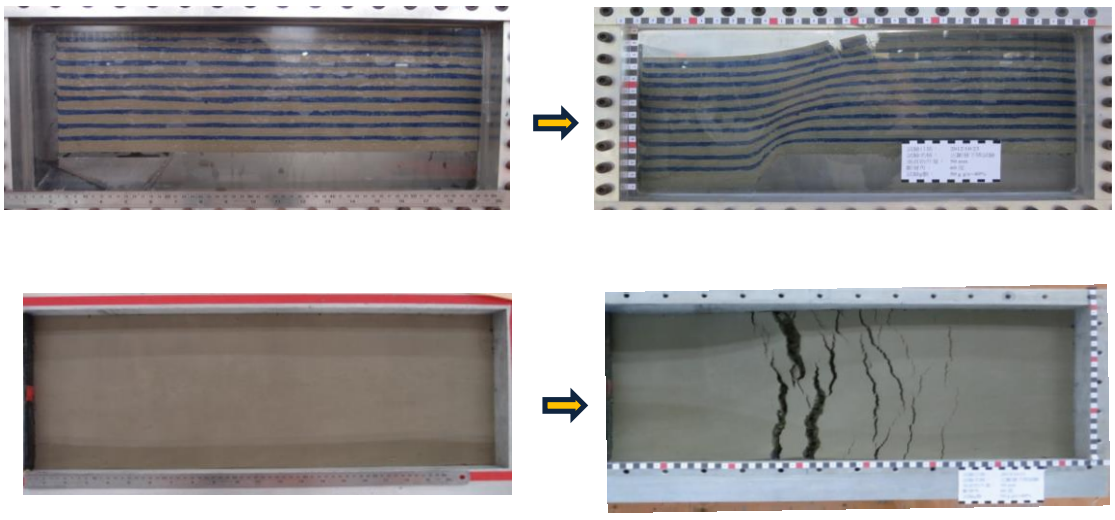


圖 3.3.23 正斷層試驗(50gNtest36-C)，試驗前後(Δh =5cm)，地表裂縫及側視圖

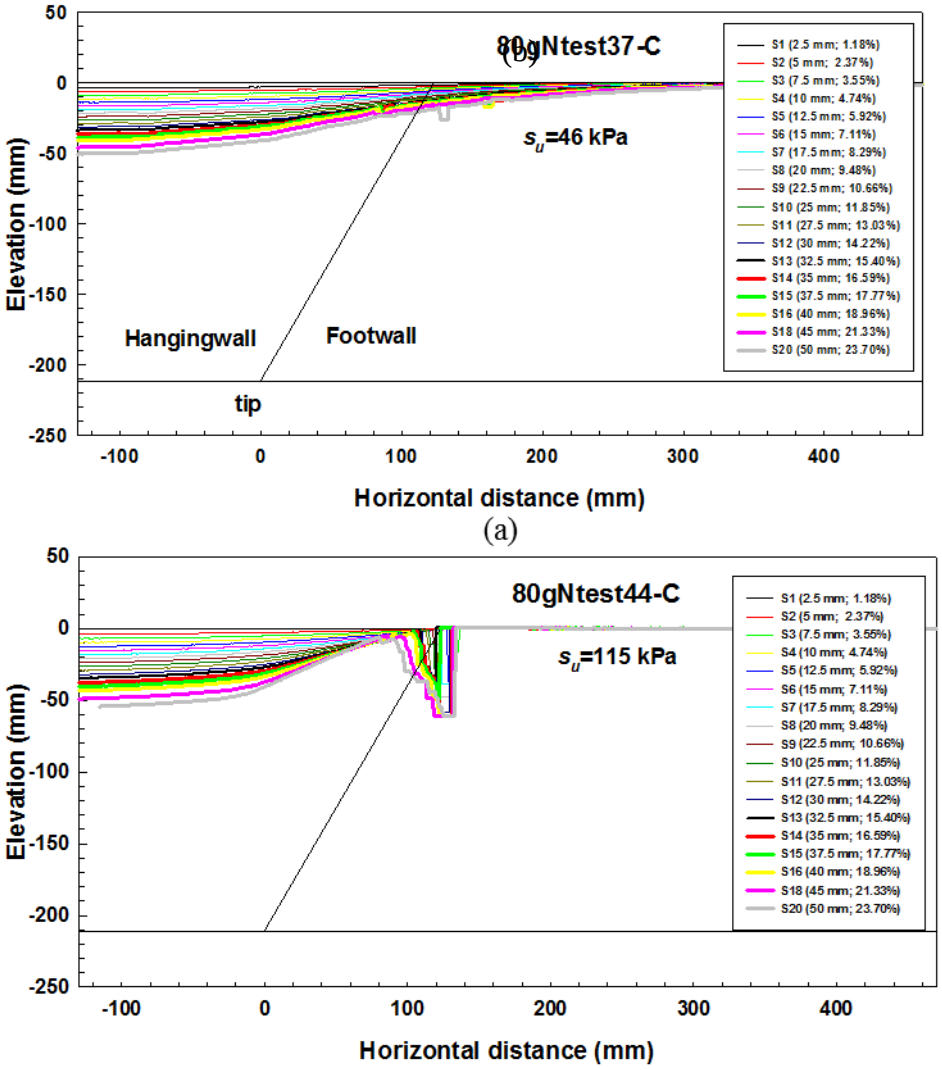


圖 3.3.24 不同剪力強度純黏土試體正斷層錯動試驗，地表剖面結果之比較。(a) 不排水剪力強度 su = 115kPa。(b)不排水剪力強度 su = 46kPa

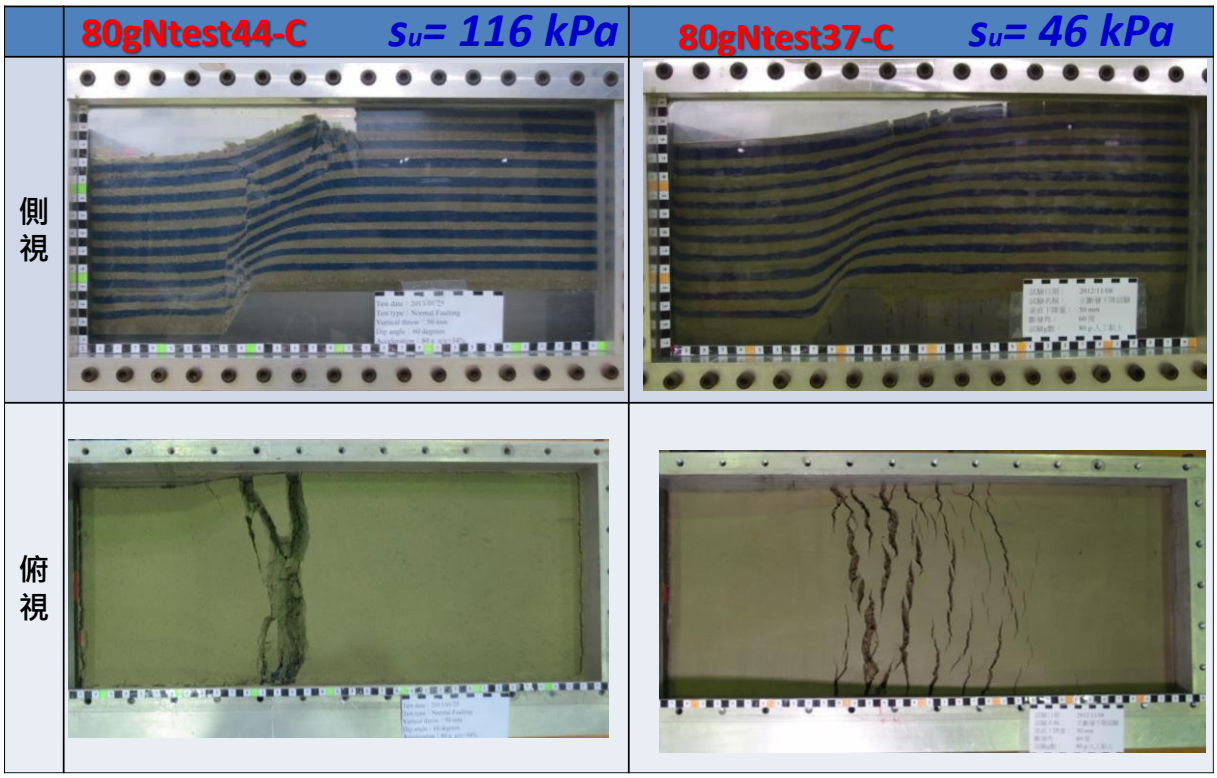


圖 3.3.25 不同剪力強度純黏土試體正斷層錯動試驗結果之比較。(a)純黏土試體不排水剪力強度 su=115kPa；(b)純黏土試體不排水剪力強度 su=46kPa

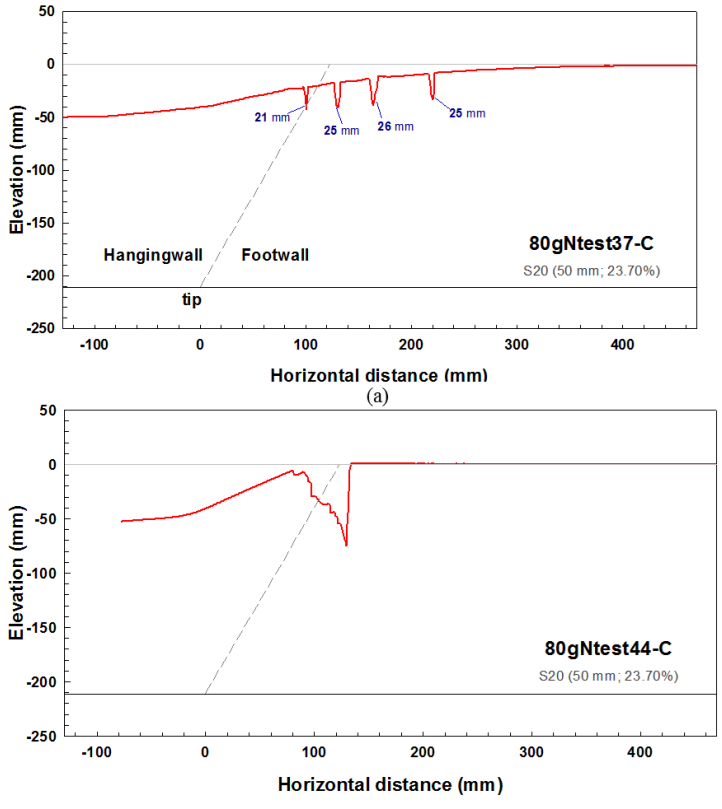


圖 3.3.26 不同剪力強度純黏土試體正斷層錯動試驗，地表剖面結果之比較。(a)純黏土試體不排水剪力強度 su=46kPa(b)純黏土試體不排水剪力強度 su=115 kPa

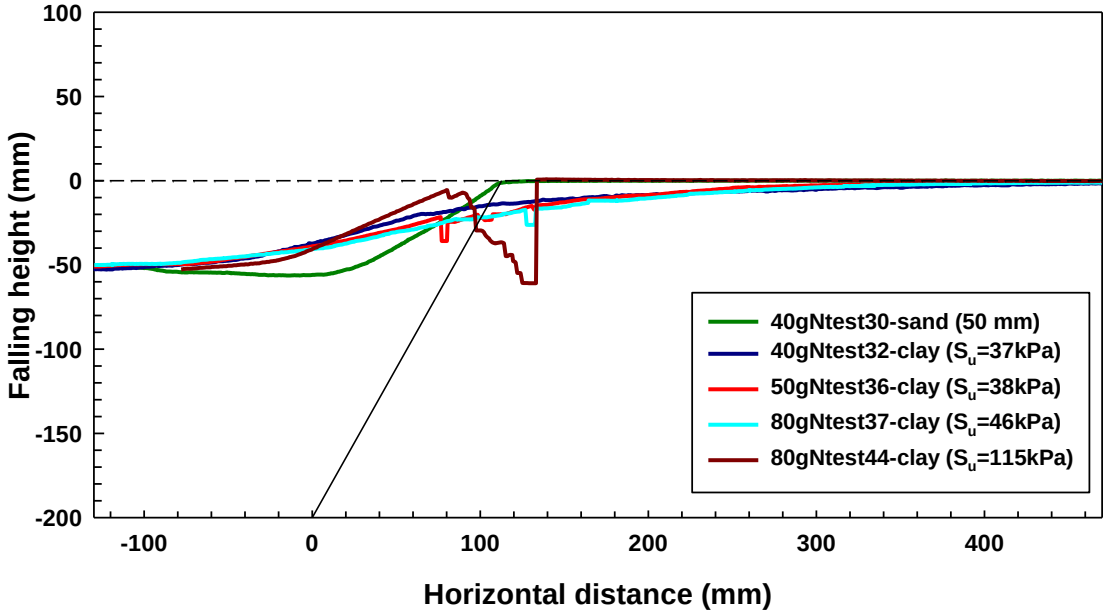


圖 3.3.27 不同剪力強度純黏土試體及砂試體正斷層錯動試驗，地表剖面結果之比較

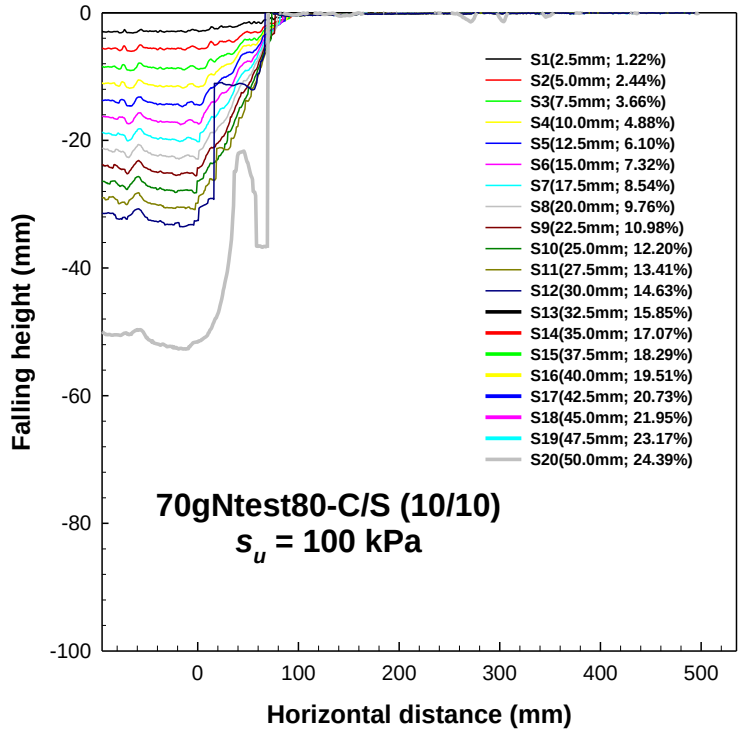


圖 3.3.28 正斷層錯動試驗(70gNtest80-C/S (10/10 ，s_u =100kPa)，在不同陷落量下的地表變位剖面

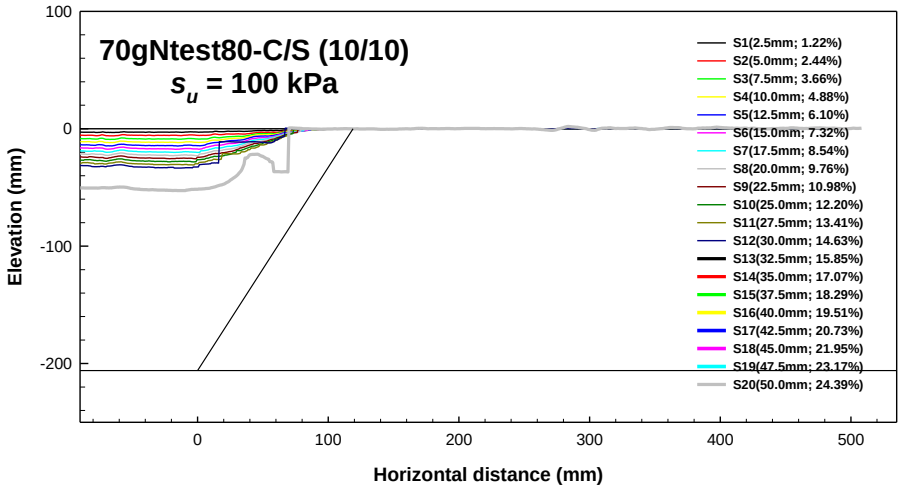


圖 3.3.29 正斷層錯動試驗(70gNtest80-C/S (10/10)，s_u =100kPa)，在不同陷落量下的地表變位剖面與正斷層角度關係

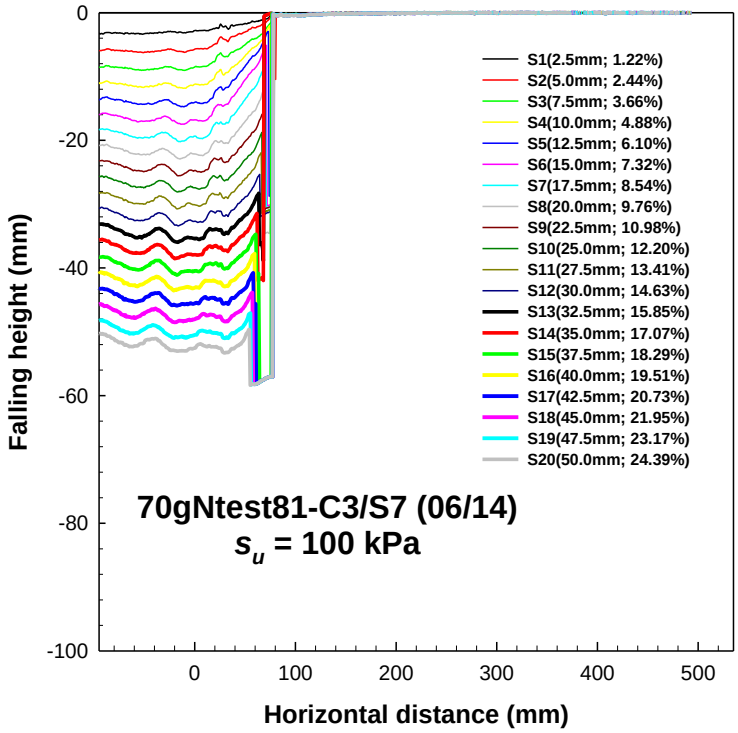


圖 3.3.30 正斷層錯動試驗(70gNtest81-C3/S7 (06/14)，s_u =100kPa)，在不同陷落量下的地表變位剖面

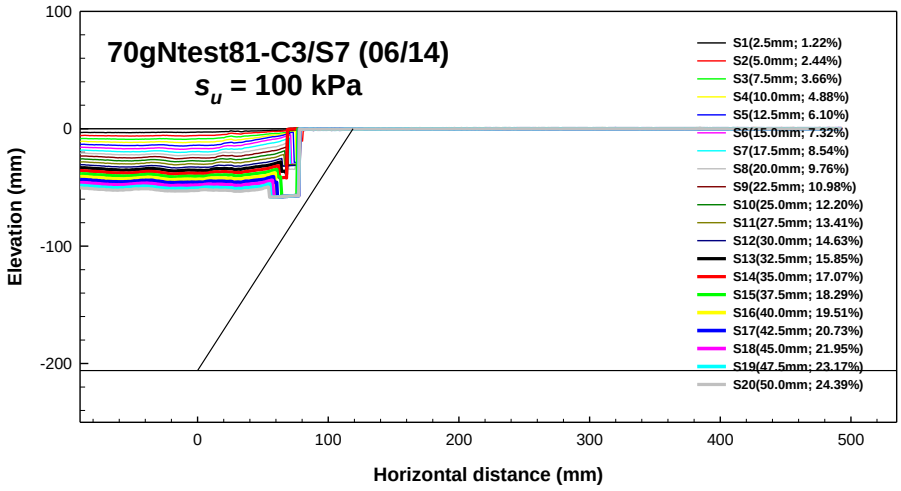


圖 3.3.31 正斷層錯動試驗(70gNtest80-C3/S7 (06/14)，s_u =100kPa)，在不同陷落量下的地表變位剖面與正斷層角度關係

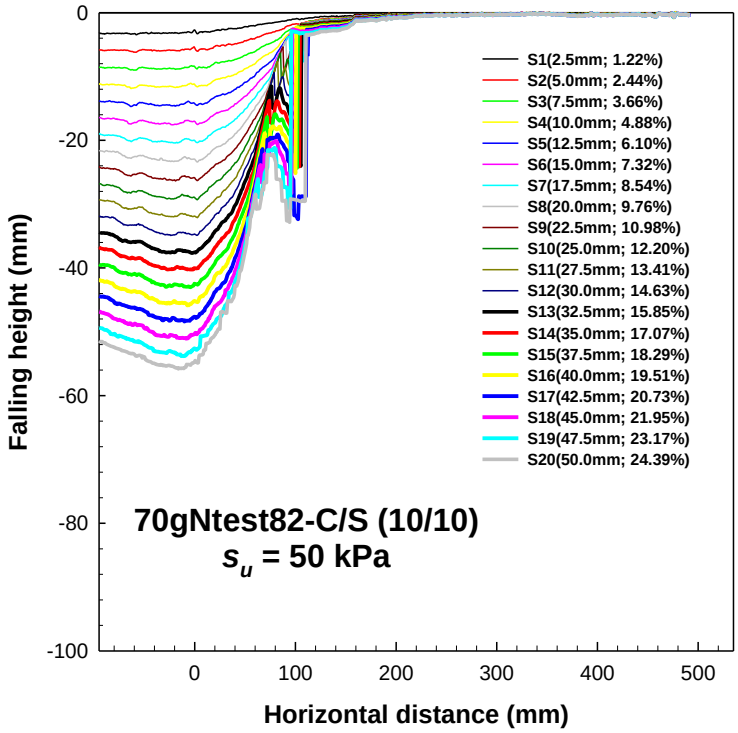


圖 3.3.32 正斷層錯動試驗(70gNtest82-C/S (10/10)，s_u = 50kPa)，在不同陷落量下的地表變位剖面

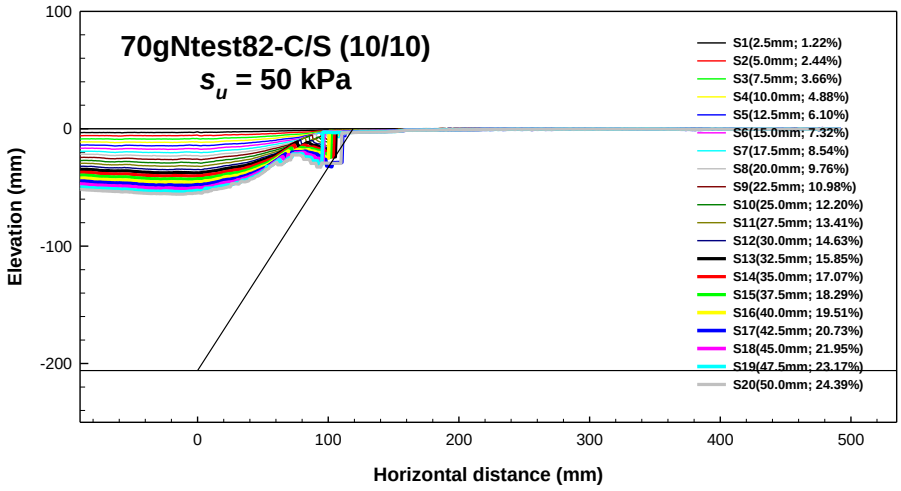


圖 3.3.33 正斷層錯動試驗(70gNtest82-C/S (10/10) ，su = 50 kPa)，在不同陷落量下的地表變位剖面與斷層角度關係

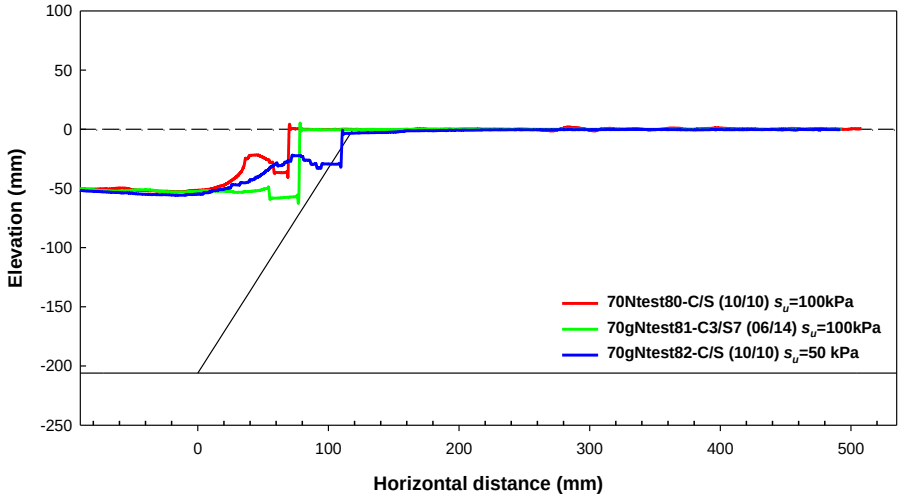


圖 3.3.34 正斷層錯動試驗，不同種類的互層地盤，在 5cm 的陷落量下，地表變位剖面之比較

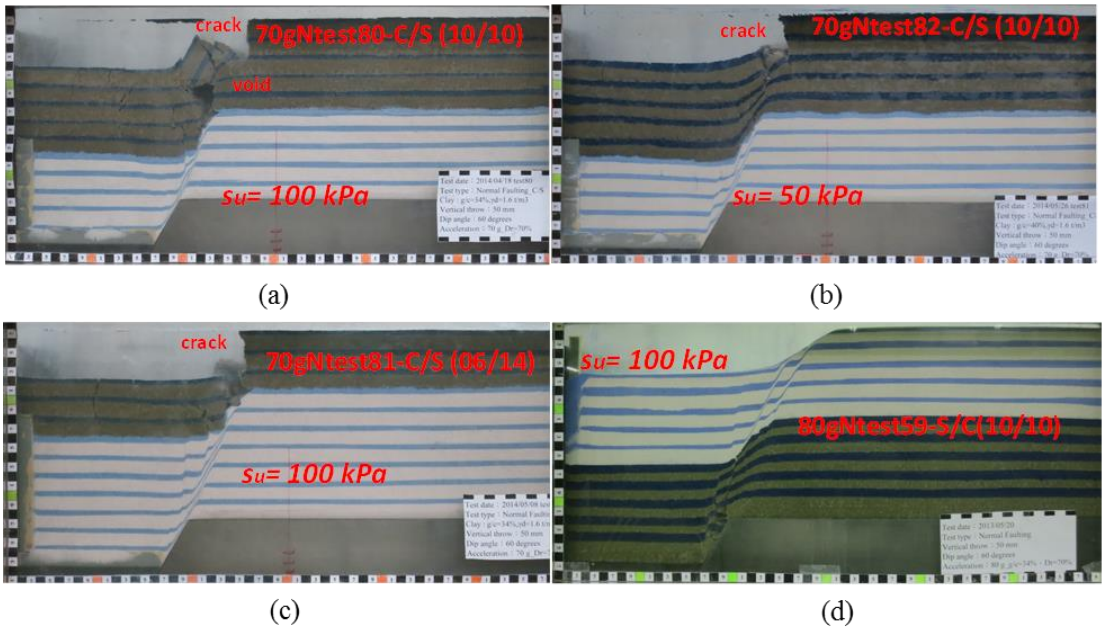


圖 3.3.35 不同土層正斷層錯動試驗，垂直陷落量 5 cm，地下斷層跡剖面的比較。(a)70gNtest80-C/S (10/10)，s_u = 100kPa；(b)70gNtest82-C/S(10/10)，s_u = 50kPa；(c)70gNtest81-C/S(06/14)，s_u = 100kPa；(d)80gNtest59-S/C(10/10)，s_u = 100kPa

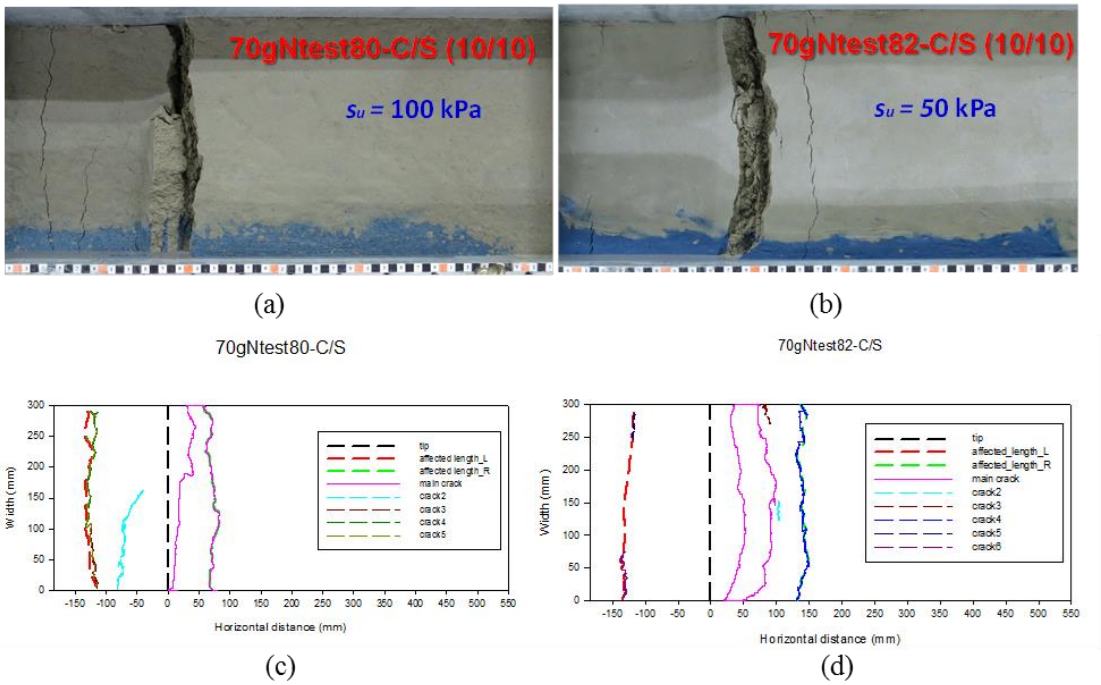


圖 3.3.36 不同黏土層正斷層錯動試驗，垂直陷落量 5 cm，地表裂縫型態及寬度的比較。(a)70gNtest80-C/S (10/10)，s_u = 100 kPa；(b)70gNtest82-C/S(10/10)，s_u = 50 kPa；(c)數位化後的地表裂縫型態 70gNtest80-C/S(10/10)，s_u = 100 kPa；(d)數位化後的地表裂縫型態 70gNtest82-S/C(10/10)，s_u = 50 kPa

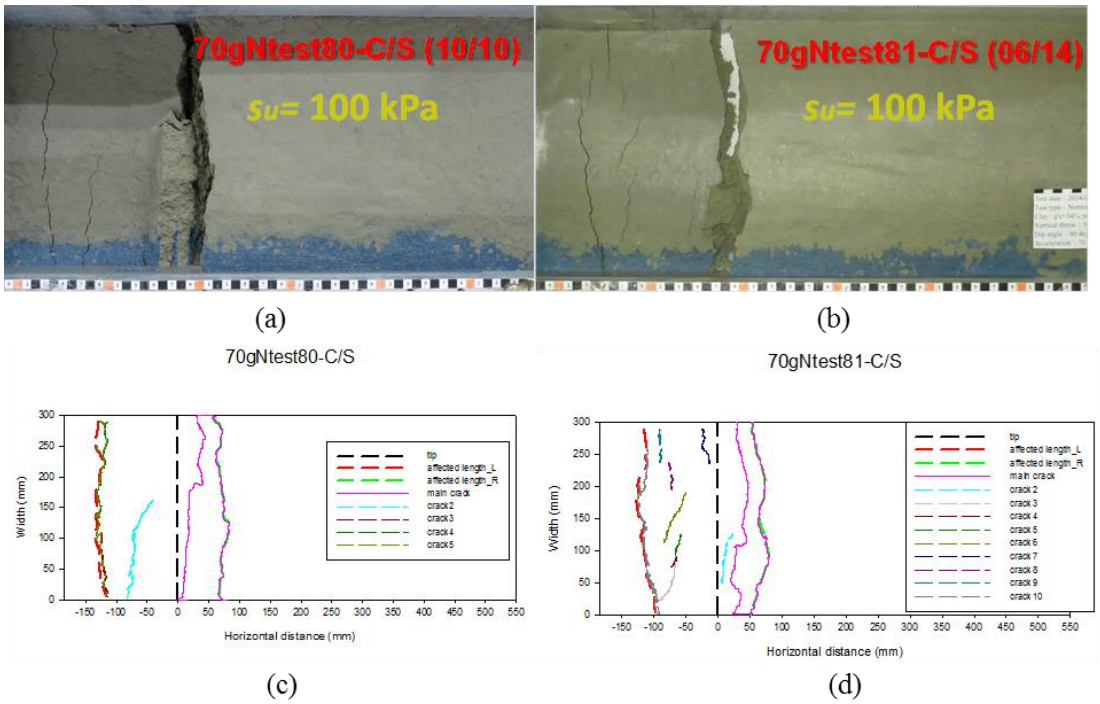


圖 3.3.37 不同黏土層厚度進行正斷層錯動試驗，垂直陷落量 5 cm，地表裂縫型態及寬度的比較。(a)70gNtest80-C/S (10/10)，s_u = 100kPa；(b)70gNtest81-C/S(06/14)，s_u = 100kPa；(c)數位化後的地表裂縫型態 70gNtest80-C/S(10/10)，s_u = 100kPa；(d)數位化後的地表裂縫型態 70gNtest81-S/C(06/14)，s_u = 10 kPa

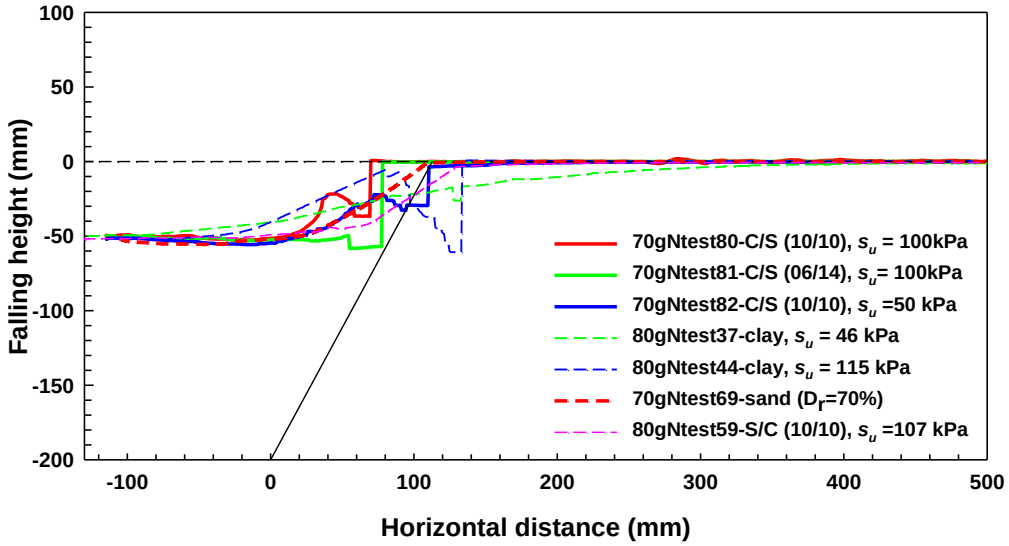


圖 3.3.38 正斷層錯動試驗，位於不同種類的互層地盤，受到 5 cm 垂直陷落量，地表變位剖面與斷層位置及斷層角度的關係及比較

3.4 橫移斷層實驗及成果

橫移斷層砂箱實驗的部份共四組試驗，因為橫移斷層之基盤錯動的型態除了傾向滑移的分量之外還需要加上走向滑移的分量，也就是設計橫移斷層上盤的砂箱必需在垂直及水平方向上都可以移動，砂箱試驗模型、座標及參數如圖 3.4.1，其中 Y 方向為斷層面延伸方向。本研究所使用之砂箱尺寸參考過去橫移斷層砂箱試驗研究，過去研究之破裂跡在 x 軸(垂直斷層面)影響範圍約為斷層兩側 H/2 位置(H 代表覆土厚度)，此外為探討是否有邊界效應，選定砂盒尺寸為 33cm(L 長) * 22cm(Wbox 寬) * 10cm(H 高) (圖 3.4.2)，其砂箱盒長度與寬度固定，而高度則視所鋪設砂層厚度而定。在砂箱實驗中，由於上覆土層厚度較小而圍壓較低，因此砂土相對密度較低屬疏鬆砂土。砂土在剪動過程中其體積產生膨脹現象較小，所以其膨脹角較低。在現地土壤因所受圍壓較大，相對密度較大，其膨脹角可能變化較大。但在現地土壤並無實驗資料可提供參考，因此未來若用於數值模擬分析，現地之膨脹角須採用參數敏感度作為分析討論。

斷層傾角優先設定為 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。

過去研究顯示，滑移速度快所形成之斷層帶之影響範圍較基盤抬昇速度慢者小。但其變形量較大，因此其崖面坡度較陡。但由於砂箱實驗中之速度、時間尺

度與真實地震錯動速度、時間尺度相較，仍有較大差距，因此本研究僅採用定速設定，仍可提供一個比對之參考，未來如有更精密模型對此問題可作更進一步比對。砂箱試驗配置鋪砂完成後，由螺桿控制動盒相對位移模擬左移斷層滑移錯動之現象，同時則將數位攝影機調整後於砂箱上方約 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(圖 3.4.3)，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 3.4.4)，相關規格如下：

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。

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。

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。

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，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。

試驗用乾燥石英矽砂來製作砂土試體土層，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。表 3.4.1 為試驗砂樣的基本物理性質；圖 3.4.5 藍線為試驗用砂篩分析曲線(與離心機實驗使用同樣的砂樣)，紅線表示橫移斷層之數值模擬粒徑分布曲線。

試驗過程

另斷層影響參數複雜，所以橫移斷層之砂箱實驗將僅探討斷層傾角為 90 度，斷層錯動總滑移量為 4cm，上覆土層為單一砂土或黏土層，且層厚定為 8、6cm(表 3.4.2)。

試驗規劃如表 3.4.3、表 3.4.4，其中 Model I 採用單一方向錯移，並將試驗結果與過去文獻進行地表破裂跡型態比較，輔以探討砂箱中心觀測區剖面觀察；Model II 採用兩方向錯移，建立不同錯移類型，如：ST-1 表示先滑移再抬升、ST-2 表示滑移與抬升分階段運動，藉以綜合討論錯動特性對地表破裂跡與土體中破裂跡分布情形。

另外就試驗後材料性質討論，本研究將針對試驗規畫 Model I 中試驗組，進行試驗前後材料取樣進行粒徑分析，藉以了解室內砂箱試驗是否會改變土層材料性質，若土層顆粒經由錯動模擬後材料顆粒粒徑明顯下降，則將砂層材料更新，不使用就有土層材料重複試驗，已減少試驗變因。

實驗砂箱滑移階段及試驗規劃如圖 3.4.6，模型 ST-1 表示，沿斷層面左移 2 公分(+Y)，再於左側砂盒進行抬升達 1.5 公分(+Z)。地表破裂跡歷程如圖 3.4.7，此模型的斷層傾角為 90 度，覆土層厚度為 6 公分，並試驗中每錯動 0.5 公分進行一次拍照記錄，其中下半側砂層表面挖取槽溝，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。

模型 ST-2 中圖 3.4.8 顯示，沿斷層面一階段左移 0.5 公分(+Y)，下階段於左側砂盒進行抬升達 0.5 公分(+Z)，反覆操作至總位移量達 2 公分，主要模擬斜向量滑移斷層，在第二階段時，因抬升作用導致地表地形高差，因此有崩積材料掩蓋住破裂跡，應為崩積楔體(colluvium wedge)，故在後續階段之地表面皆可觀察到破裂跡與堆積線型。

透過試驗可觀察(圖 3.4.9)，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。

砂箱試驗可透過俯視圖與側視圖綜合討論：

ST-1－滑移、抬升：

俯視：抬升 1cm(ΔH/H=0.13)，隆起側砂土層開始崩滑，崖部與趾部影響範圍皆在 R-shears 範圍內。

S－純滑移：

俯視：初始滑移達 1cm(ΔH/H=0.13)，發展出 Riedel shears 的地表破裂跡，其後地表破裂跡發展 Y shear (ΔH/H=0.27)。

側視：滑移作用使地表土層隆起，其破裂跡較基盤處明顯。(圖 3.4.10)

ST-2－滑移&抬升：

俯視：Colluvial wedge 易將地表破裂跡掩蓋。

側視：依照發展順序不同，破裂跡發展至地表有轉彎現象。(圖 3.4.11)

S 與 ST-1 比較討論：

俯視：地表影響範圍以錯移量較大的 Sy(滑移)控制。

S 與 ST-2 比較討論：

俯視：地表影響範圍以較大錯移量控制，各模型階段地表破裂跡特徵如圖 3.4.12，如：A 點主要為錯移產生 R-shear；B 點主要為抬升產生崩崖。斷層錯移

量值皆相同情況 C、D(ΔH/H=0.27)，地表影響範圍相當(W/H≈0.67)，但影響原因不同。

側視：抬升造成覆土層變形顯著，如： A 點剖面不易觀察出土體內破裂尖端；B 點剖面可明顯描繪不只一條破裂面。

表 3.4.1 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 3.4.2 模型試驗配置

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

表 3.4.3 驗證砂箱之試驗規劃

	Model I					
Slip type	Normal fault		Thrust fault		Strike slip fault	
No.	N-1	N-2	T-1	T-2	S-1	S-2
Fault angle	90°					
Slip ratio (S_x:S_y:S_z)	0：0：-1	0：0：-2	0：0：+1	0：0：+2	0：+1：0	0：+2：0
Evolution	z(-1)	z(-2)	z(+1)	z(+2)	y(+1)	y(+2)

表 3.4.4 本研究砂箱之試驗規劃

	Model II							
Slip type	Strike slip and dip slip (Oblique-slip fault)							
No.	ST-1	ST-2	TS-1	TS-2	SN-1	SN-2	NS-1	NS-2
Fault angle	90°							
Slip ratio (S_x:S_y:S_z)	0：+2：+2				0：+2：-2			
Evolution	y(+2)-z(+2)	y(+0.5)-z(+0.5)-y(+1)-z(+1)-y(+1.5)-z(+1.5)-y(+2)-z(+2)	z(+2)-y(+2)	z(+0.5)-y(+0.5)-z(+1)-y(+1)-z(+1.5)-y(+1.5)-z(+2)-y(+2)	y(+2)-z(-2)	y(+0.5)-z(-0.5)-y(+1)-z(-1)-y(+1.5)-z(-1.5)-y(+2)-z(-2)	z(-2)-y(+2)	z(-0.5)-y(+0.5)-z(-1)-y(+1)-z(-1.5)-y(+1.5)-z(-2)-y(+2)

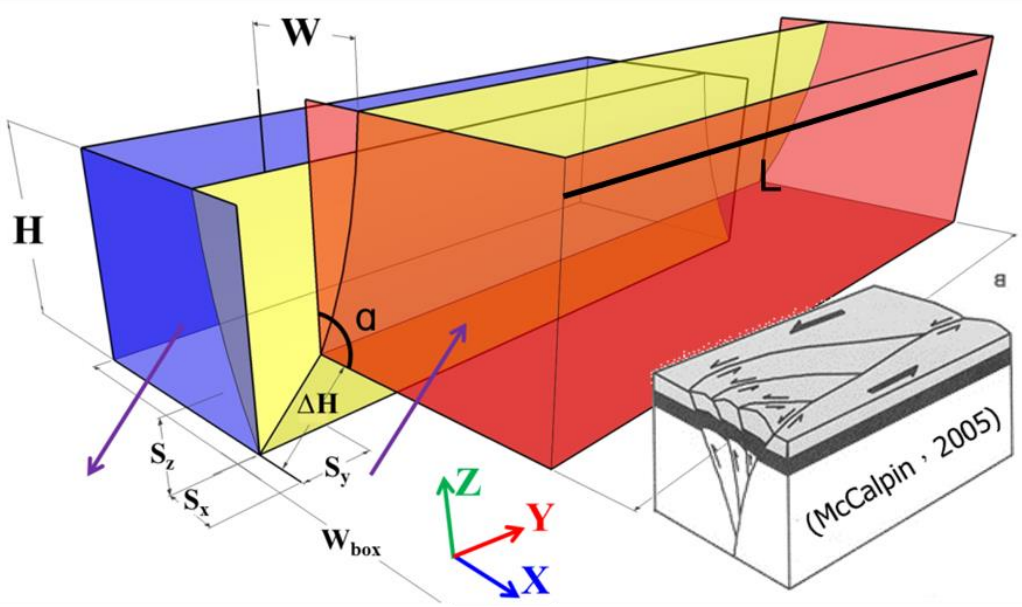


圖 3.4.1 砂箱試驗模型、座標及參數

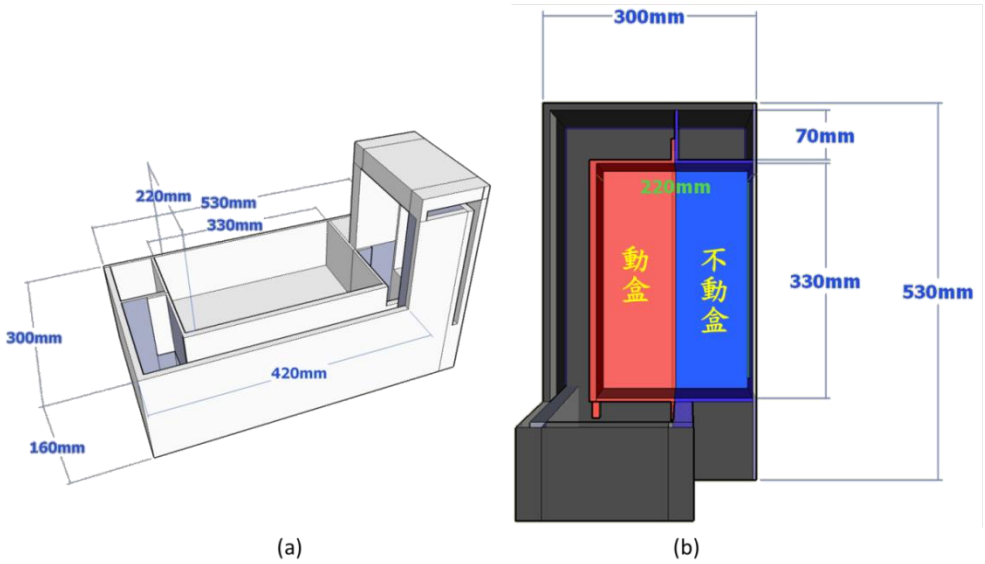


圖 3.4.2 橫移斷層砂試驗模型。(a)側視圖(b)俯視圖

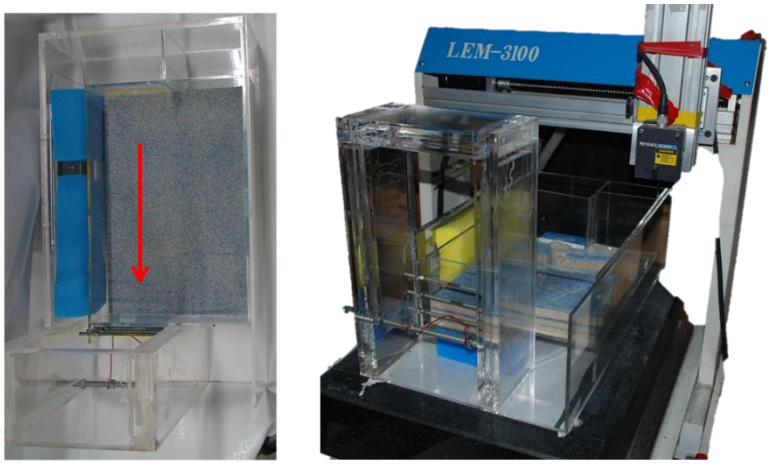


圖 3.4.3 (a)砂箱模型鋪沙狀況及(b)設置於雷射掃描儀



圖 3.4.4 雷射掃描測距系統

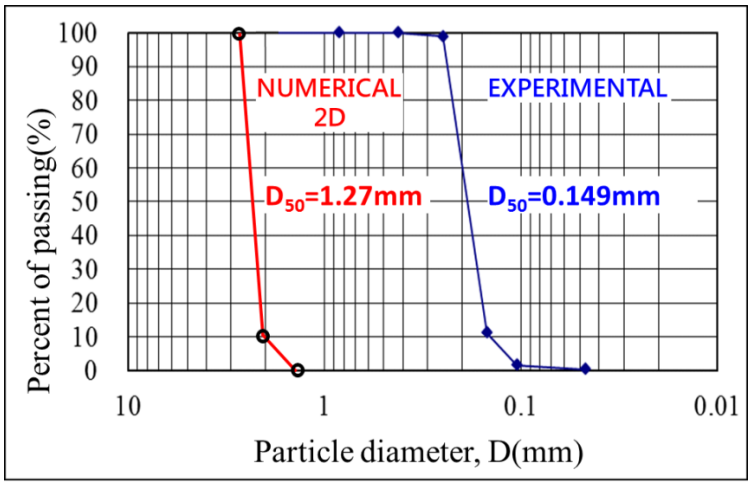
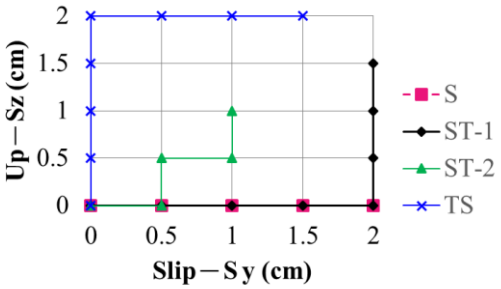


圖 3.4.5 橫移斷層試驗粒徑分布曲線



Slip type	Strike slip fault	Strike slip and dip slip (Oblique-slip fault)		
No.	S	ST-1	ST-2	TS
Fault angle	90°			
Slip ratio (S_x:S_y:S_z)	0：+1：0	0：+2：+2		
Evolution	y(+2)	y(+2)-z(+1.5)	y(+0.5)-z(+0.5)-y(+0.5)-z(+0.5)-	z(+2)-y(+2)

圖 3.4.6 橫移砂箱試驗之地表破裂跡歷程

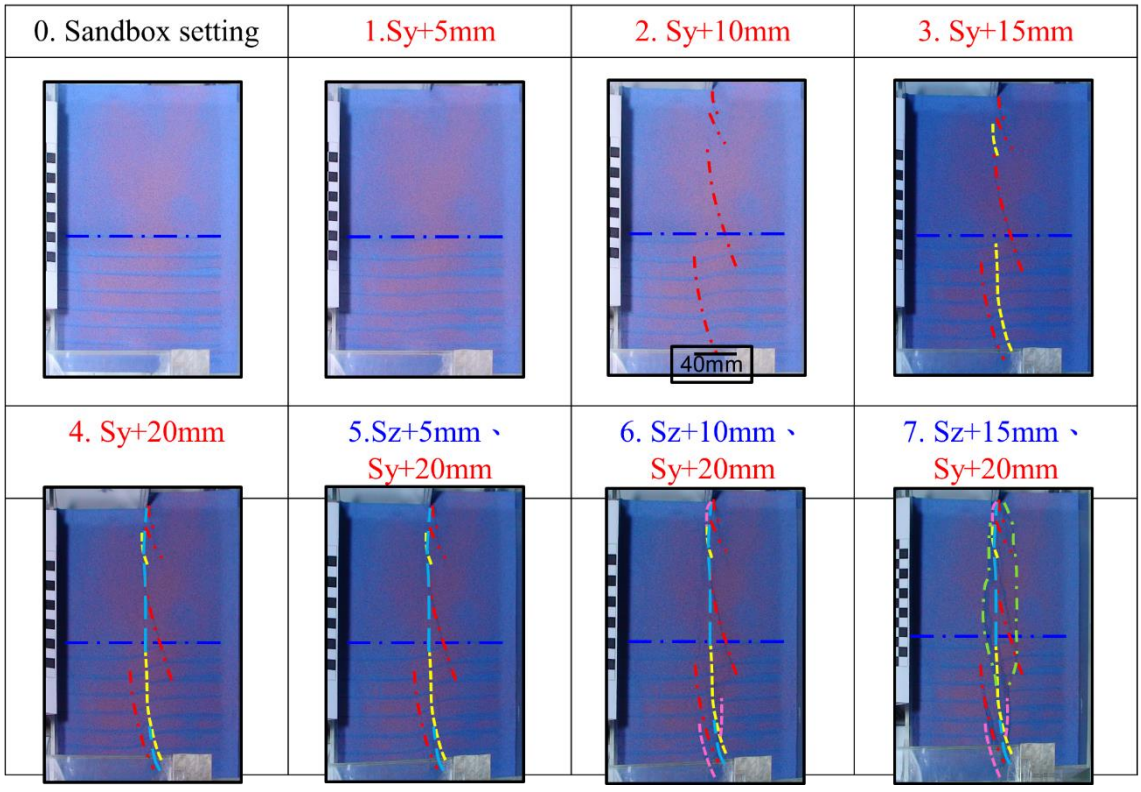


圖 3.4.7 橫移砂箱試驗之地表破裂跡歷程-ST-1

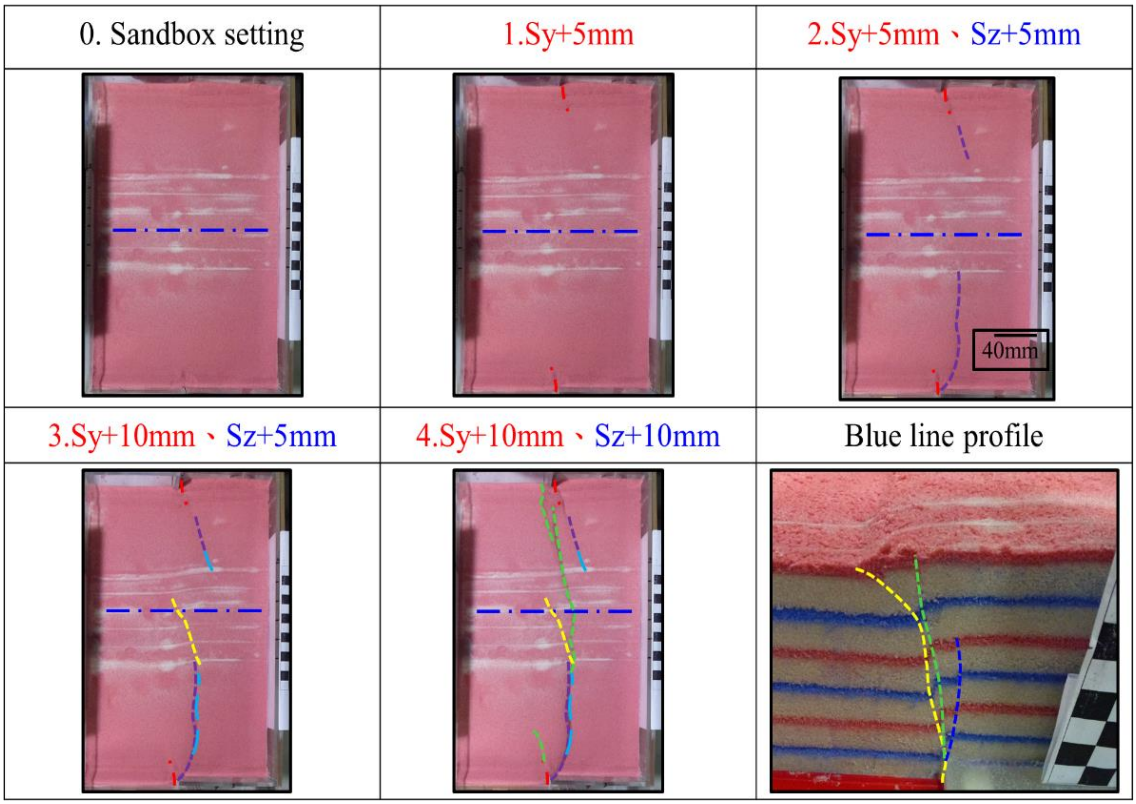


圖 3.4.8 橫移砂箱試驗之地表破裂跡歷程-ST-2

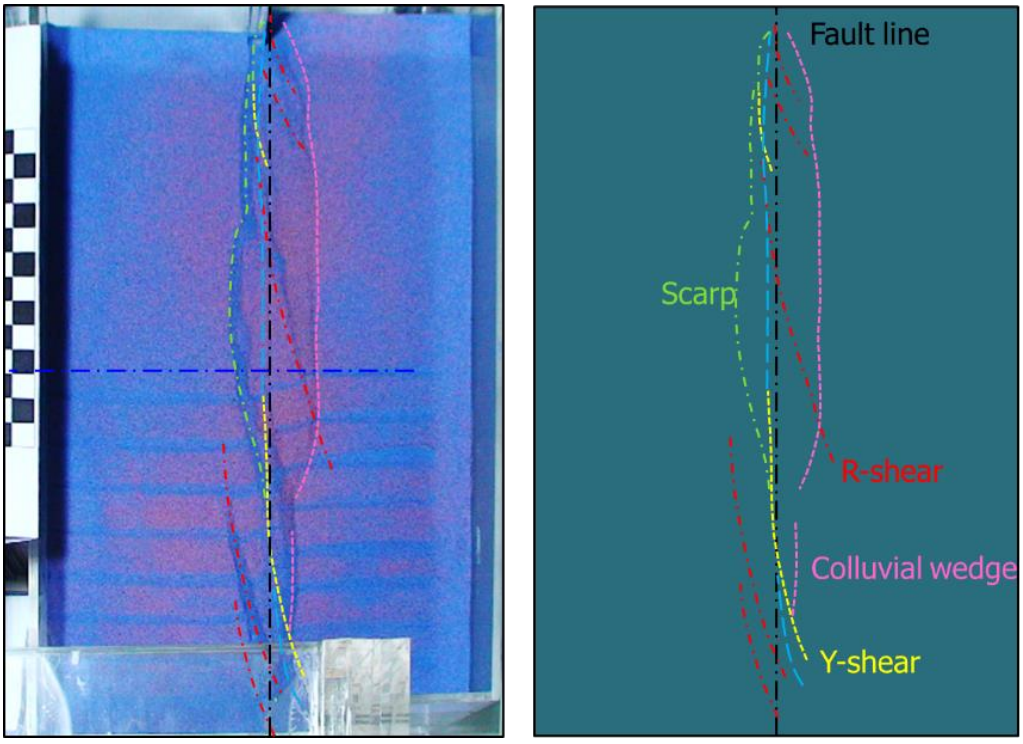


圖 3.4.9 橫移砂箱試驗之地表破裂跡歷程

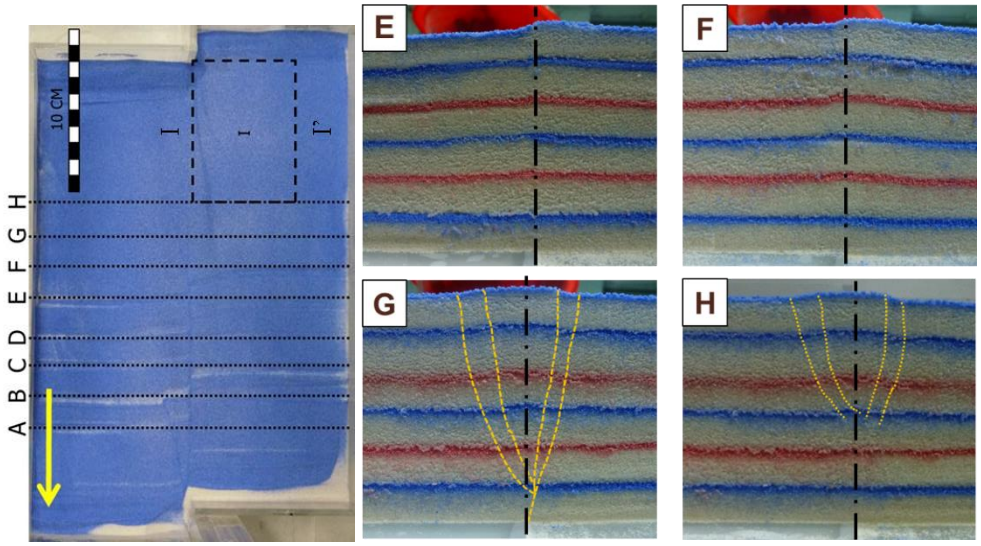


圖 3.4.10 橫移砂箱試驗之地表破裂跡歷程--S

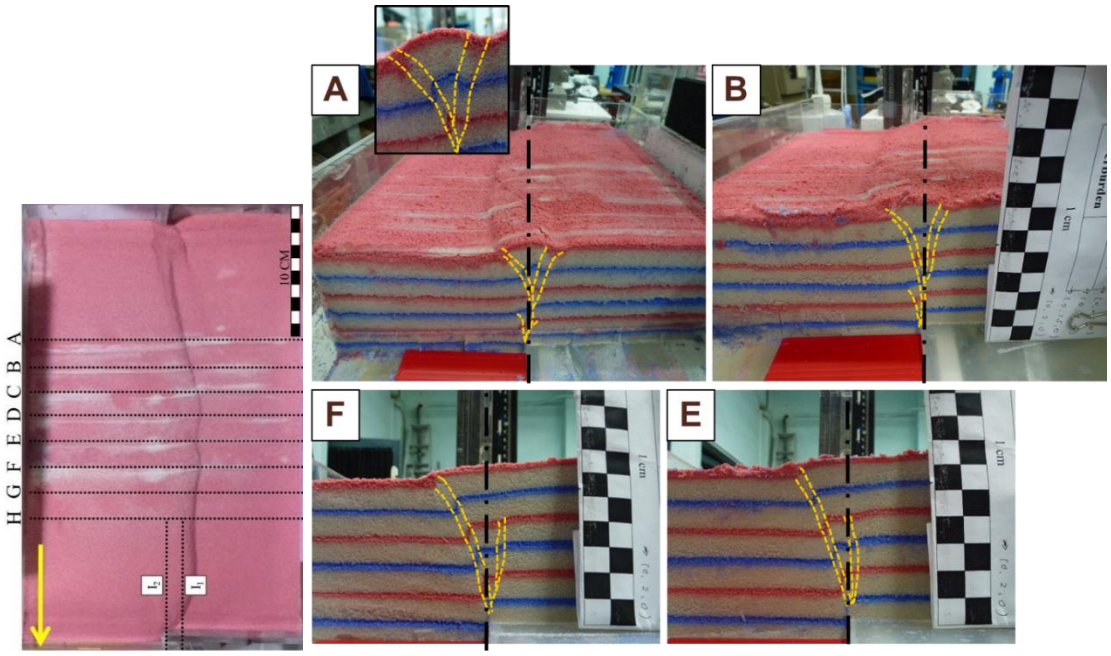


圖 3.4.11 橫移砂箱試驗之地表破裂跡歷程—ST-2

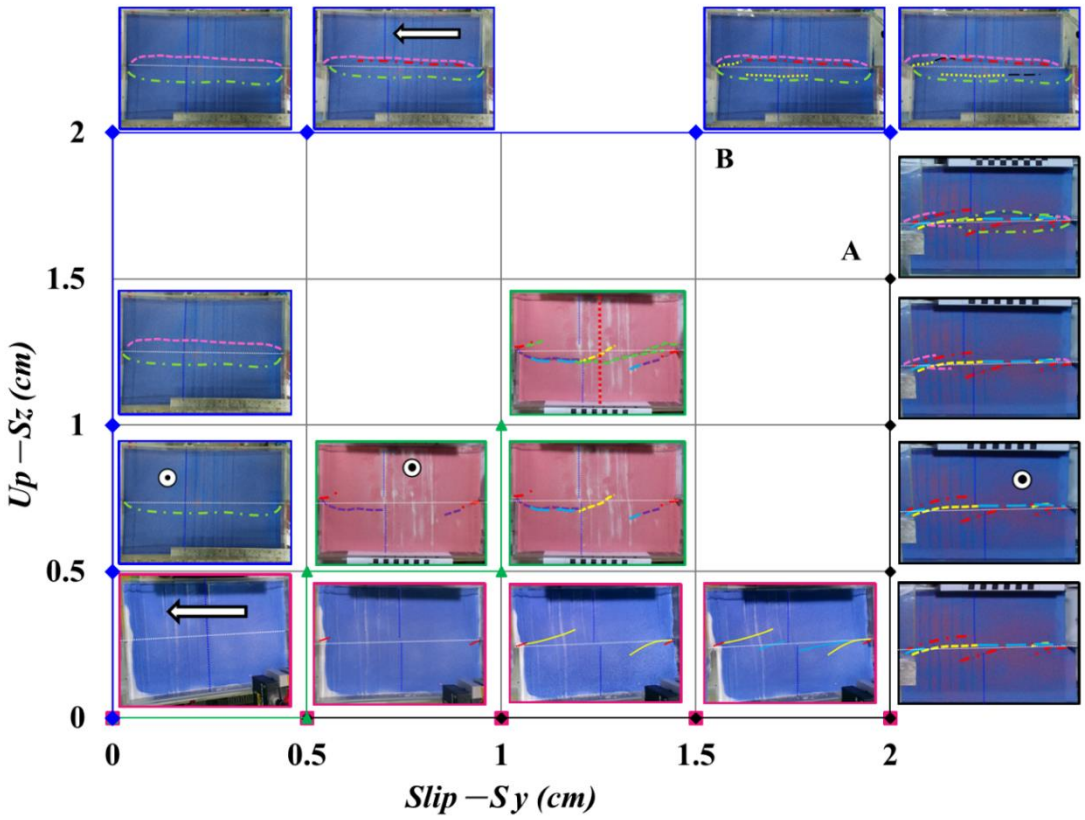


圖 3.4.12 橫移砂箱試驗之地表破裂跡歷程

第四章、數值模擬研究成果

4.1 微觀參數與物理實驗校核成果

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

4.1.1 離心模型自重壓密試驗

離心模型試驗從 1g 飛行至 80g 的過程中，可以利用雷射位移計量測不同 g 值時發生的地表沈陷。圖 4.1.1 為離心模型試驗飛行階段的累積地表沈陷與試驗砂床(10cm 深處)有效覆土應力的關係（本系列試驗砂床相對密度 Dr=70%）。隨著飛行 g 數的增加，有效覆土應力亦隨著重力場的增加而增加，累積地表沈陷量亦隨之增加。本斷層錯動模擬試驗箱設計時，在設計最大應力的條件下，側牆之最大側向變位遠小於側牆高度之千分之一，因此從土壤力學側向土壓力的觀點，在飛行階段，試體床均保持 K_o 狀態。一般正常壓密砂土，利用經驗公式$K_o = \sigma'_h/\sigma'_v = 1 - sin\emptyset'$，可以求得有效水平側向土壓力與垂直覆土應力的比值，其中 ϕ'=砂土的內摩擦角。

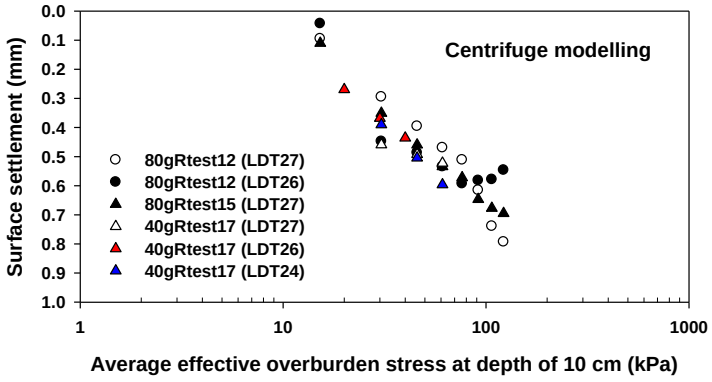


圖 4.1.1 離心模型試驗飛行階段的地表沈陷與有效覆土應力的關係（Dr=70%）

4.1.2 PFC2D 自重壓密數值試驗

本節討論顆粒流分析程式，PFC2D (Particle Flow Code in 2 Dimensions)進行逆斷層錯動的模擬，並且與離心模型實驗數據進行比對及分析。利用離心模型試驗自重壓密階段的結果來率定 PFC2D 的微觀參數。PFC 以個別元素法(Distinct Element Method, DEM)為理論基礎，屬於非連續體分析法。PFC 基本假設、特色及運用分述如下：

顆粒為剛體，顆粒本身不可變形。顆粒間接觸面積小。

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

相鄰顆粒重疊量，可藉由力和位移關係式計算求得。

所有的顆粒均為圓形，鍵結力存在於顆粒間之接觸點。

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

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

圖 4.1.2 為微觀模式組成率與巨觀模式組成律間的關係，假設顆粒在小應變情況下，顆粒受力階段組構沒有改變。在此受力情況下，Yimsiri & Soga 考慮不

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

$$E_v = \frac{4r^2N}{3V(3-a)}\left[\frac{21(5+a)^2K_nK_s}{(70-10a)K_n+(105+45a)K_s}\right] \quad \text{式 4.1.1}$$

$$E_h = \frac{4r^2N}{3V(3-a)}\left[\frac{21(5-3a)^2K_nK_s}{(70-30a)K_n+(105-75a)K_s}\right] \quad \text{式 4.1.2}$$

$$G_{vh} = G_{hv} = \frac{4r^2N}{3V(3-a)}\left[\frac{21(5+a)^2(5-3a)^2K_nK_s}{(50-10a)[(105-46a-23a^2)K_n+(70-24a+2a^2)K_s]}\right] \quad \text{式 4.1.3}$$

$$G_{hh} = \frac{4r^2N}{3V(3-a)}\left[\frac{21(5-3a)^2K_nK_s}{[(210-110a)K_n+(140-100a)K_s]}\right] \quad \text{式 4.1.4}$$

$$\nu_{vh} = \left[\frac{(7-a)(5+a)(K_n-K_s)}{(5-3a)[(14-2a)K_n+(21+9a)K_s]}\right] \quad \text{式 4.1.5}$$

$$\nu_{hv} = \left[\frac{(7-a)(5-3a)(K_n-K_s)}{(5+a)[(14-6a)K_n+(21-15a)K_s]}\right] \quad \text{式 4.1.6}$$

$$\nu_{hh} = \left[\frac{(7-5a)(K_n-K_s)}{[(14-6a)K_n+(21-15a)K_s]}\right] \quad \text{式 4.1.7}$$

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

N ＝顆粒接觸點個數(coordinate numbers)；

r ＝球半徑；

V ＝堆積體的體積(volume of assembly)；

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

上式中的 $\frac{4r^2N}{3V} = f(e)$=孔隙比的函數=常數，為了簡化分析，假設$\frac{4r^2N}{3V} = f(e) = 1$，則圖 4.1.3 及圖 4.1.4 分別為為$\frac{K_n}{K_s} = 3$，不同$K_n$值，對應巨觀組成律參數楊氏係數($E_v$及 E_h)、剪力模數(G_{vh} 及 G_{hh})以及柏松比(ν_{hh}，ν_{vh}及ν_{hv})與組構異向性程度的關係圖。圖中顯示在固定的$\frac{K_n}{K_s}$，增加K_n值會增大巨觀組成律參數中的楊氏係數(E_v及 E_h)、剪力模數(G_{vh} 及 G_{hh})；但是柏松比(ν_{hh}，ν_{vh}及ν_{hv})並不會因的K_n值的增加或減少而改變。另外$a > 0$代表有較多的顆粒接觸點的方向(contact normal)偏向於垂直方向，因此有較大的E_v及G_{vh} 和G_{hh}，但是有較小的E_h及G_{hh}。而$a < 0$代表有較多的顆粒接觸點的方向(contact normal)偏向於水平方向，因此有較小的E_v及G_{vh} 和G_{hh}，但是有較大的E_h及G_{hh}。

圖 4.1.5、圖 4.1.6 及圖 4.1.7 別為固定的$K_n = 8000000N/m$，不同$\frac{K_n}{K_s}$值，對應巨觀組成律參數楊氏係數(E_v 及 E_h)、柏松比(ν_{hh}，ν_{vh}及ν_{hv})及剪力模數(G_{vh}、G_{hv} 及 G_{hh})以及柏松比(ν_{hh}，ν_{vh}及ν_{hv})與組構異向性程度的關係圖。圖中顯示在固定K_n值，增加$\frac{K_n}{K_s}$值會減少巨觀組成律參數中的楊氏係數(E_v及E_h)、剪力模數(G_{vh}及 G_{hh})及柏松比(ν_{hh})；至於柏松比(ν_{hh}及ν_{hv}) ，在$a < 0$時，隨著$\frac{K_n}{K_s}$值的增加而增加；但是$a > 0$時，隨著$\frac{K_n}{K_s}$值的增加而減少，但是變化不大。PFC2D 運算過程中可以自行考慮組構的變化(a)，因此上述諸圖可以提供微觀參數與巨觀參數間的相互關係，有助於掌握 PFC2D 所需的微觀參數。

為了簡化問題，本研究假設堆積體為等向(isotropic granular assembly，a=0)，則式 4.1.1 至式 4.1.7 可改寫成下列諸式(式 4.1.8 至式 4.1.11)：

$$E = E_v = E_h = \frac{4r^2N}{9V}\left[\frac{15K_nK_s}{2K_n+3K_s}\right] \quad \text{式 4.1.8}$$

$$G = G_{vh} = G_{hv} = \frac{4r^2N}{9V}\left[\frac{15K_nK_s}{6K_n+4K_s}\right] \quad \text{式 4.1.9}$$

$$\nu = \nu_{vh} = \nu_{hv} = \frac{K_n-K_s}{2K_n+3K_s} = \frac{\frac{K_n}{K_s}-1}{(2\frac{K_n}{K_s}+3)} \quad \text{式 4.1.10}$$

$$K_s = \frac{1-2\nu}{1+3\nu}K_n \quad \text{式 4.1.11}$$

其中 $\frac{4r^2N}{9V} = f(e)$=孔隙比的函數

由上述四個方程式，可以推論巨觀參數的柏松比僅和K_n/K_s的比值有關，而楊氏係數及剪力模數則同時跟K_n及K_s有直接的關係。因此式 4.1.8 至式 4.1.11 提供了等向堆積體巨觀參數及微觀參數間的相互關係。假設$\frac{K_n}{K_s} = c$，則$\nu = \frac{c-1}{2c+3} = d$；$E = \frac{4r^2N}{9V}\frac{15K_n}{3+2c}$。由前節的討論，固定的$K_n/K_s$的比值，則柏松比固定，E 值僅和$K_n$有關。

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

$$\varepsilon_v = \frac{\sigma_v}{E} - \nu\frac{\sigma_h}{E} \quad \text{式 4.1.12}$$

$$\because \varepsilon_h = \frac{\sigma_h}{E} - \nu\frac{\sigma_v}{E} = 0 \qquad \text{式 4.1.13a}$$

$$\therefore \sigma_h = \nu\sigma_v \qquad \text{式 4.1.13b}$$

$$\varepsilon_v = \frac{\sigma_v}{E} - \nu^2\frac{\sigma_v}{E} \qquad \text{式 4.1.14}$$

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

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

$$M_{PFC} = \frac{\sigma_v}{\varepsilon_v} = \frac{1}{(1-\nu^2)}E = \frac{1}{(1-d^2)}\frac{4r^2N}{9V}\frac{15K_n}{3+2c} = f(e)AK_n \qquad \text{式 4.1.15}$$

其中 A 為常數。

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

$$\varepsilon_v = \frac{\sigma_v}{E} - 2\nu\frac{\sigma_h}{E} \qquad \text{式 4.1.16}$$

$$\because \varepsilon_h = \frac{\sigma_h}{E} - \nu\frac{\sigma_h}{E} - \nu\frac{\sigma_v}{E} = 0 \qquad \text{式 4.1.16a}$$

$$\therefore \sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu}\sigma_v \qquad \text{式 4.1.16b}$$

$$K_o = \frac{\nu}{1-\nu} = 1 - sin\phi' \qquad \text{式 4.1.16c}$$

利用試驗砂床的內摩擦角，可以求得在靜止土壓力狀態下的柏松比。

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

$$M_{centrifuge} = \frac{\sigma_v}{\varepsilon_v} = \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}E = \frac{(1-d)}{(1+d)(1-2d)}\frac{4r^2N}{9V}\frac{15K_n}{3+2c} = f(e)BK_n \qquad \text{式 4.1.17}$$

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

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

$$M = N\sigma_z^m \qquad \text{式 4.1.18}$$

其中 N 為常數；m 為經驗值，一般而言介於 0.4~0.5 間。因此在數值模型中

可以合理假設不同深度處的K_n亦隨著σ_z^m的增加而增加。本研究試驗採用石英矽砂，滑動模式所需的微觀參數，$\mu = \tan\phi_\mu = \tan 25^o = 0.466$。

本研究 PFC2D 數值模擬所使用顆粒的篩分析曲線與試驗石英矽砂的篩分析曲線如圖 4.1.8 所示。由於電腦儲存空間及運算時間的限制，本研究採用篩分析曲線平行移動的方式，放大顆粒尺寸約 20 倍。顆粒半徑分別為 1.49mm、1.05mm 及 0.74mm，其中顆粒半徑 1.49mm 佔全體重量 90.2%、顆粒半徑 1.05mm 佔全體重量 5.5%、顆粒半徑 0.74mm 佔全體重量 4.3%。利用這三種不同粒徑的顆粒來堆積試驗砂床，進行 PFC2D 的數值模擬。首先利用數值方法來模擬砂床的堆積，其建立步驟如下：

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。

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。

製作完成的圓盤堆積，進行自重平衡，直至不平衡力比小於 0.01 才停止。

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

建構的數值模型的邊界條件如圖 4.1.9(a)及圖 4.1.9(b)所示，而建構的正斷層數值模型的邊界條件如圖 4.1.9(c)所示。逆斷層數值模擬試體床高度為 20cm(與物理模型之試體床高度相同)，分成 10 個子層。每一子層高度 2cm，每一子層可以考慮覆土應力的大小，依據式 4.1.18 的經驗式，分別輸入隨深度增加而增加的微觀參數，K_n。本研究首先進行 20cm 的試體床，由 1g 升至 80g 進行數值模擬

自重壓密數值試驗(self-weight consolidation numerical test)，來計算數值地盤的地表沈陷量。由式 4.1.16c 可以得到試體床的內摩擦角約 38^o，因此止土壓力係數K_o=0.32，因此$\nu = 0.24$，另外由式 4.1.9 可以得到$\frac{K_n}{K_s} = 3.3$。

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

圖 4.1.10 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 數值試驗（m 分別為 0.2，0.4，0.5）地表沈陷的比較。圖中顯示隨著K_n的增加(m 減少)，地表沈陷量逐漸減少，當 m=0.4 可以得到最佳的符合程度。因此可以合理推定$K_n = 0.58 \times \frac{10^7 N}{m}$，$\frac{K_n}{K_s} = 3$，及$\mu$ =0.466，利用這三個微觀參數，以及本研究所建立的數值模型可以用來模擬離心正斷層或逆斷層錯動模型的試驗成果。

圖 4.1.11(a)為 PFC2D 數值試驗$\mu = \tan 25° = 0.466$與 80g 物理模型試驗(80gRtest23)之成果比較，在較小的上升錯動量（小於 15%的上覆土層厚度）與 80g 物理模型試驗(80gRtest23)之成果可以得到相當一致的結果，可是在較大的上升錯動量，則顯示 PFC2D 的計算成果有較平緩的邊坡，有更多的砂土崩落於坡腳，而 80g 物理模型試驗成果則有較陡的邊坡。造成此差異的原因可能是本研究假設 PFC2D 的微觀參數μ等於石英的基本摩擦角=25o 較低所導致。本研究離心模型試驗所使用的試驗用砂是磨碎細砂(crushed sand)，砂顆粒表面粗糙，導致砂顆粒基本摩擦角較大。圖 4.1.11(b)則採用微觀參數$\mu = \tan 30° = 0.577$，與 80g 物理模型試驗(80gRtest23)之成果比較，圖中顯示與離心物理模型試驗(80gRtest23)之地表變形剖面可以得到相當一致的模擬成果。圖 4.1.11(c)則採用微觀參數μ=tan36^o=0.726，與 80g 物理模型試驗(80gRtest23)之成果比較，圖中顯示

與離心物理模型試驗(80gRtest23)之地表變形剖面也可以得到相當一致的模擬成果。本研究最終選定的 PFC2D 的微觀參數為$K_n = 0.5 \times \frac{10^7 N}{m}$，$\frac{K_n}{K_s} = 3$，及μ = tan36 = 0.726，做為未來 PFC2D 數值試驗的微觀參數。

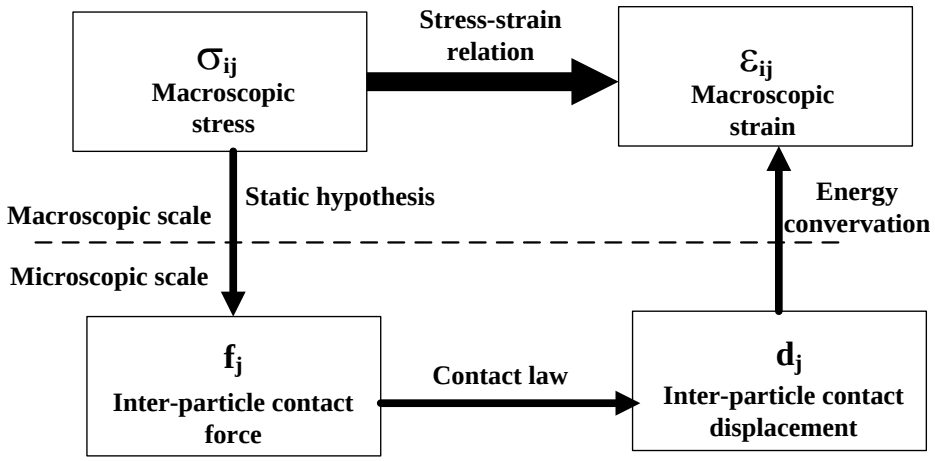


圖 4.1.2 微觀模式組成率與巨觀模式組成率間的關係

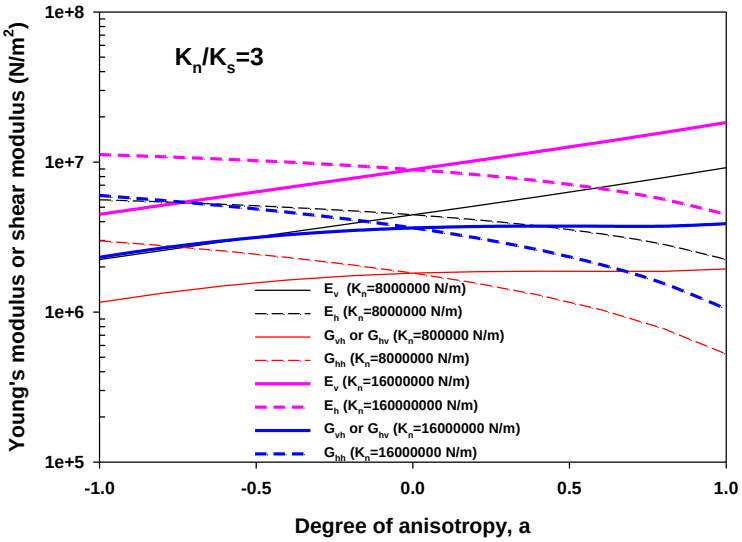


圖 4.1.3 $\frac{K_n}{K_s} = 3$，不同的K_n值，與楊氏係數(E_v 及 E_h)及剪力模數(G_{vh} 及 G_{hh})與異向性程度的關係

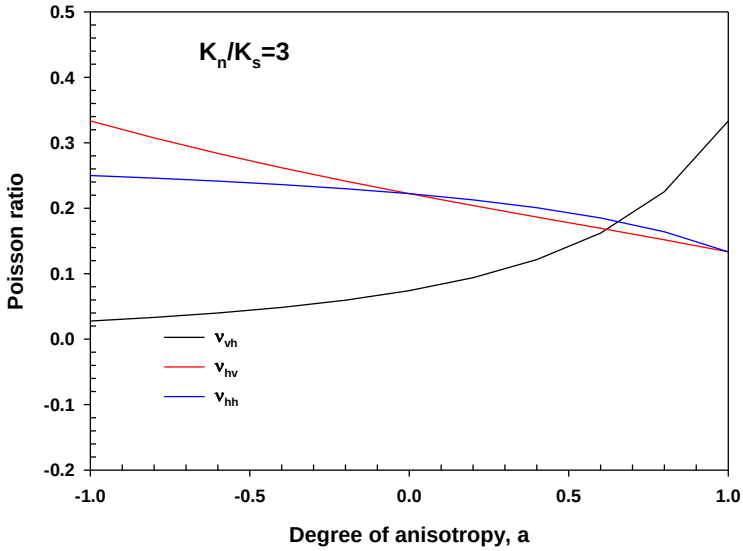


圖 4.1.4 $\frac{\mathrm{K}_n}{\mathrm{K}_s}=3$，不同的$\mathrm{K}_n$值，與柏松比($\nu_{hh}$，$\nu_{vh}$及$\nu_{hv}$)與異向性程度的關係

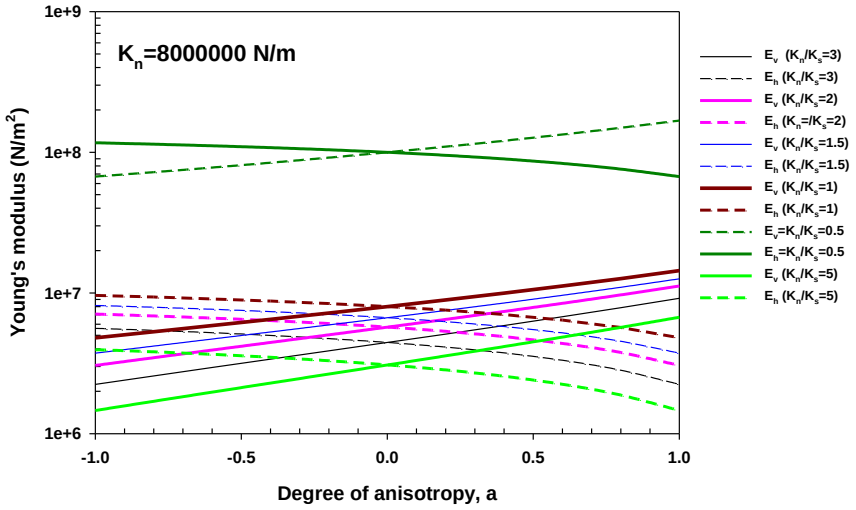


圖 4.1.5 $\mathrm{K}_n=8000000N/m$，不同的$\frac{\mathrm{K}_n}{\mathrm{K}_s}$值，與楊氏係數($E_v$及$E_h$)與異向性程度的關係

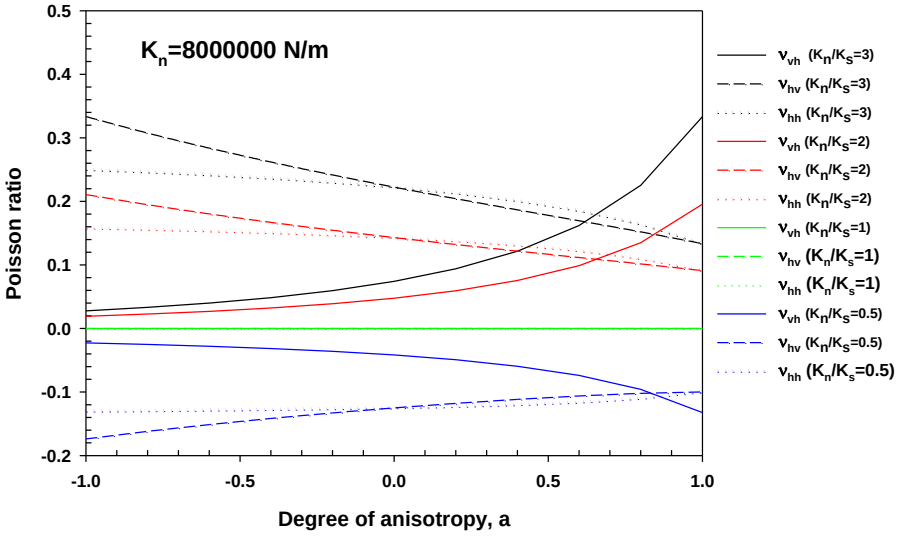


圖 4.1.6 $K_n = 8000000N/m$，不同的$\frac{K_n}{K_s}$值，與柏松比(ν_{hh}，ν_{vh}及ν_{hv})與異向性程度的關係

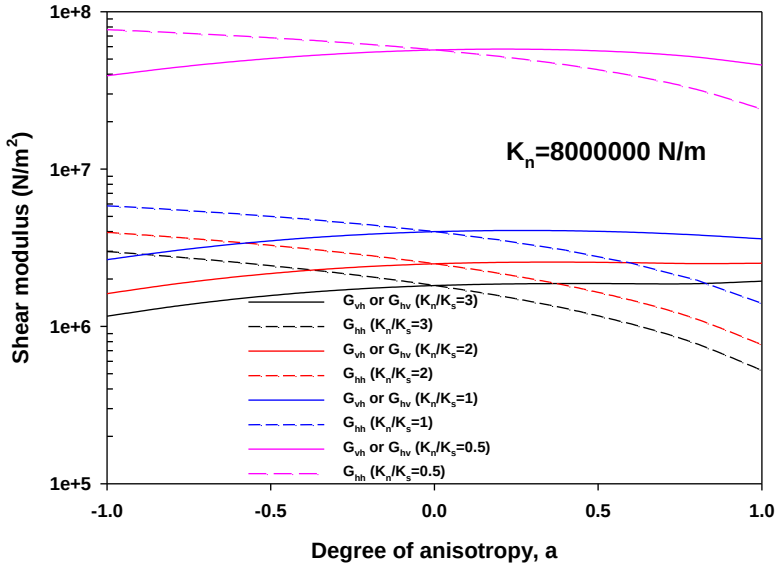


圖 4.1.7 $K_n = 8000000N/m$，不同的$\frac{K_n}{K_s}$值，與剪力模數(G_{vh} ，G_{vh}及G_{hh})與異向性程度的關係

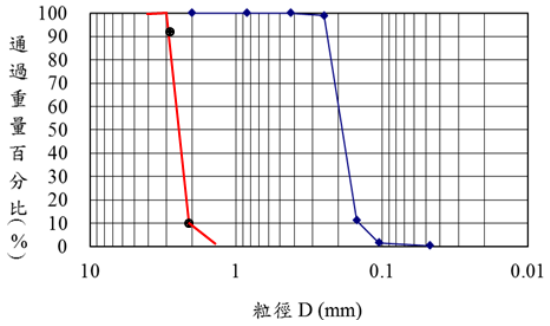


圖 4.1.8 數值模擬所使用顆粒的篩分析曲線與試驗石英矽砂的篩分析曲線之比較

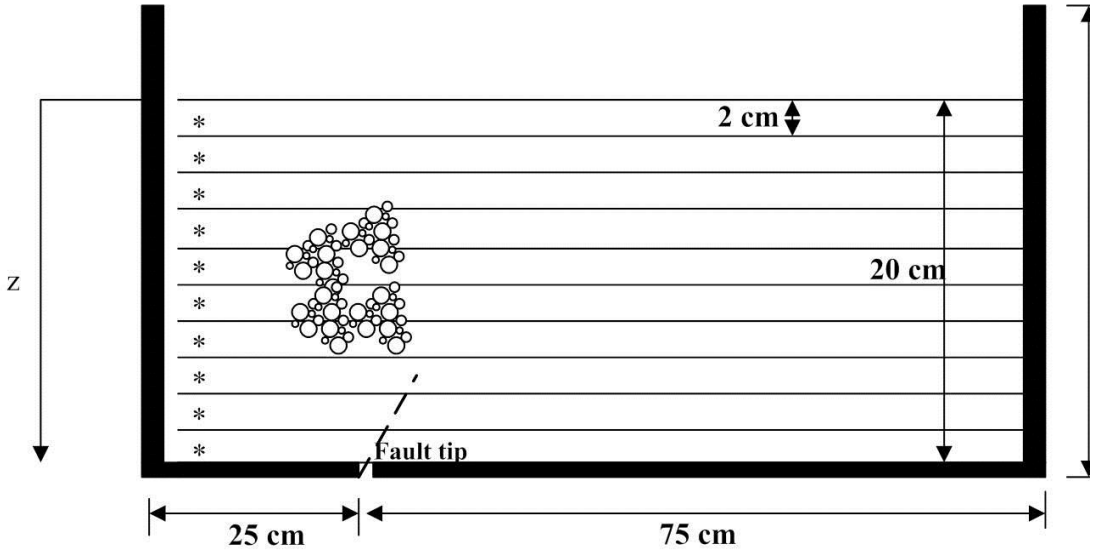


圖 4.1.9(a) 建構完成後的數值試驗模型

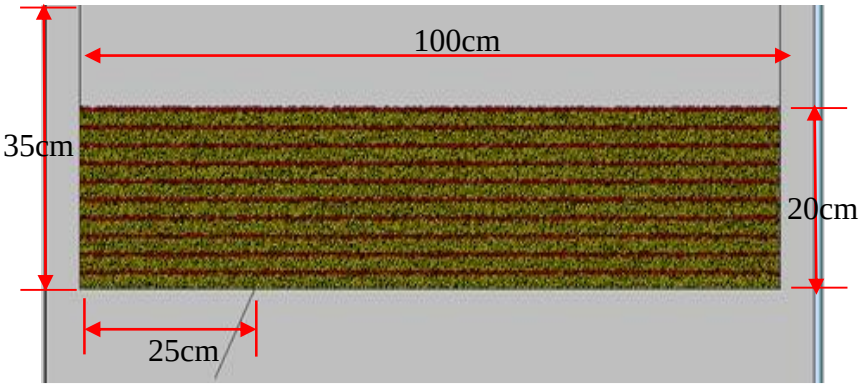


圖 4.1.9(b) 建構完成後的數值試驗模型及分層示意圖

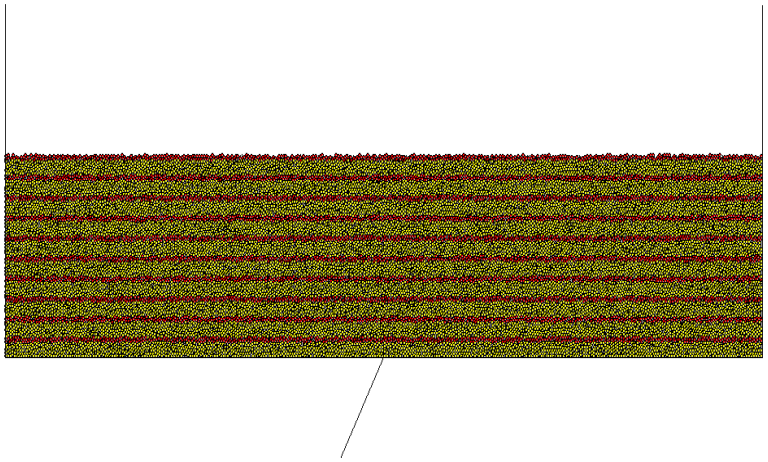


圖 4.1.9(c)建構完成後的正斷層數值試驗模型及分層示意圖

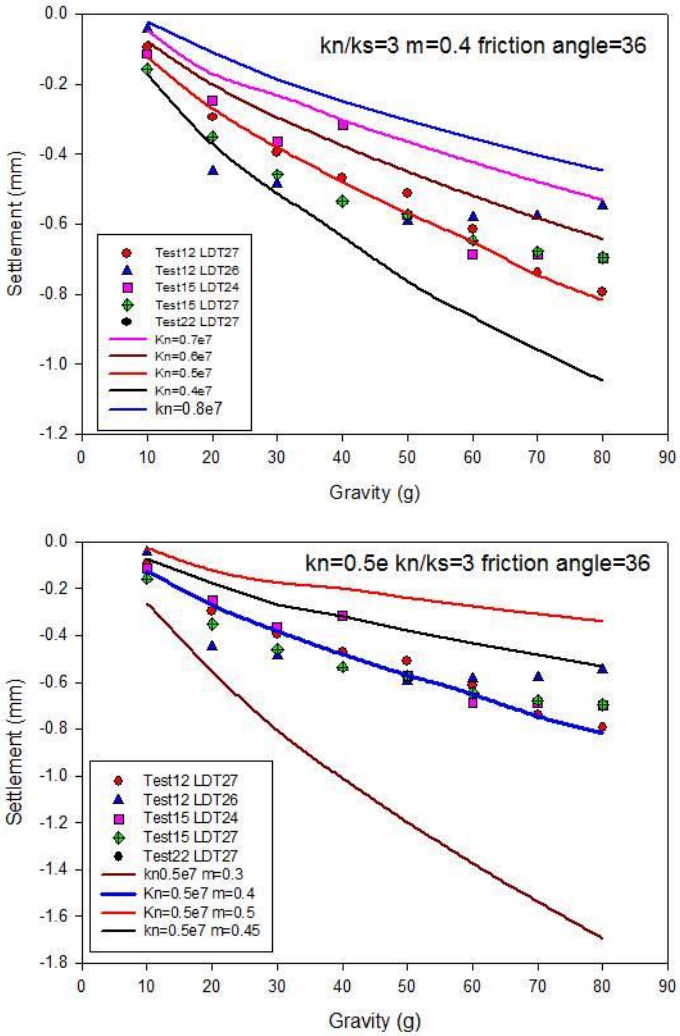
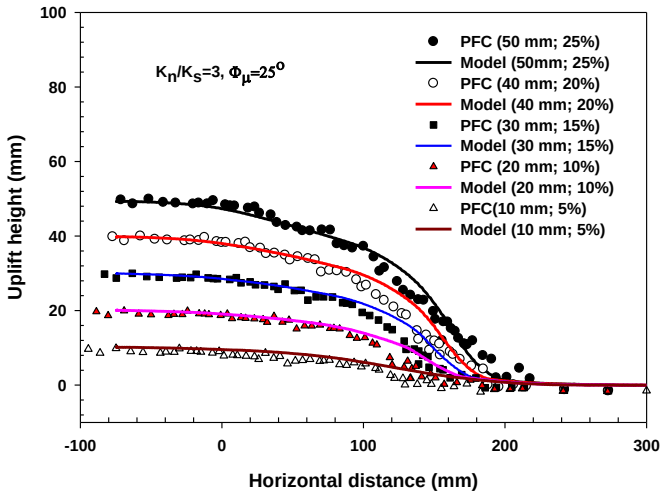
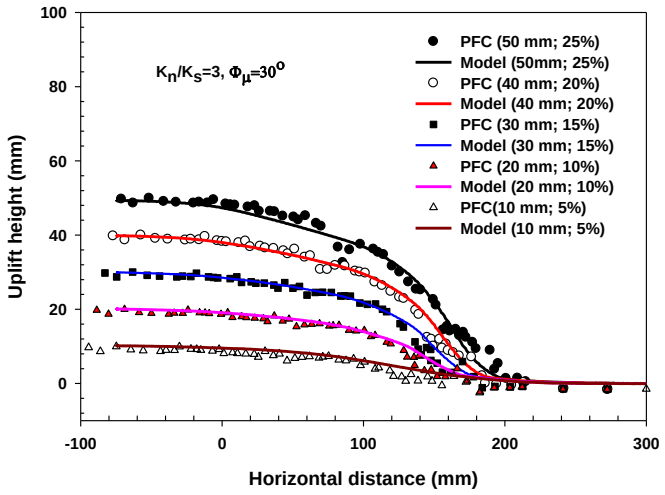


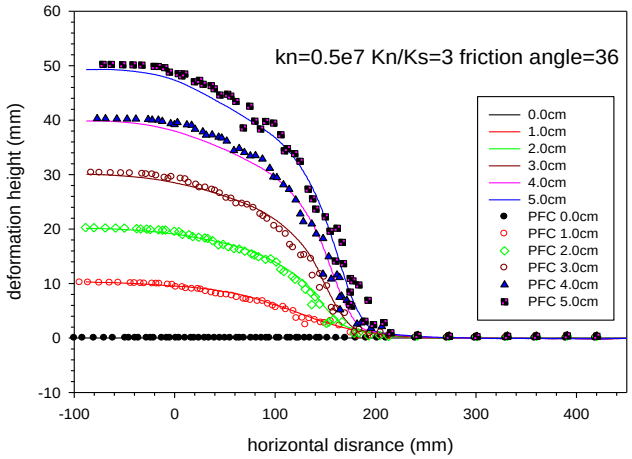
圖 4.1.10 離心模型試驗的地表沈陷與 PFC^{2D} 數值試驗地表沈陷的比較



(a)ϕ_μ=25°



(b)ϕ_μ=30°



(c)ϕ_μ=36°

圖 4.1.11 不同錯動量下，離心機試驗的地表沈陷與 PFC2D 模擬地表變形剖面之比較

4.1.3 直剪數值模擬中砂土之摩擦角

為了能使進行斷層錯動數值試驗時，所使用之顆粒組構與進行直剪模擬分析之顆粒組構有最小的差異，本分析進行直剪模擬之顆粒組構，由原斷層分析數值模型中獲得。本研究之 D_{max}=0.298cm，並且選用長寬分別為 6cm x 4cm、12cm x 18cm、30cm x 20cm 及 100cm x 20cm 之模型進行直接剪力試驗並進行比較。圖 4.1.12 為本研究 PFC 直剪試驗模擬模型與斷層錯動實驗之數值模型之關係。表 4.1.1 則為 PFC 直剪數值試驗之模型尺寸及顆粒大小與直剪盒尺寸關係。

上述 4 種不同尺寸的直剪數值模型，分別以不同顆粒間之摩擦係數，輸入 PFC 直剪數值模型中，則可得輸入顆粒摩擦角與 PFC 直剪模型所求得摩擦角之關係圖(圖 4.1.13)。將圖 4.1.13 之數值做迴歸分析，可得$\boldsymbol{y = y_0 + ax^b}$之回歸方程式參數(表 4.1.2)。由圖 4.1.13 顯示:

1.在低顆粒摩擦角下，所輸出之 PFC 模型摩擦角會大於輸入之顆粒摩擦角。

2.在較高顆粒摩擦角下，所輸出之 PFC 模型摩擦角會遠小於輸入之顆粒摩擦角。

3.PFC 模型寬度較長者，模型輸出之摩擦角較小。

4.L/H 比值相等下，PFC 模型寬度較長者，其模型輸出之摩擦角較小。

5.模型尺寸較小，模型可輸出較高之摩擦角。

由於直剪盒尺寸對 PFC 模型輸出之摩擦角有一定之影響，PFC 直剪試驗試驗所得之摩擦角與模擬顆粒 D_{max} 大小、模型的長度(L)與高度(H)之比值有關。依照 Wang & Gutierrez(2010)建議，在 H/Dmax>=40、L/Dmax>=60、L/H=1.5~2 下，可得到較合理的 PFC 直剪試驗模擬。本分析 PFC 直剪數值模型，以直剪盒的尺寸 18cm x 12cm 做為研究之主軸。

表 4.1.1 PFC 直剪試驗模擬模型尺寸及顆粒大小與直剪盒尺寸關係

No.	Shear box (cm x cm)		D_{max} (cm)	L/H	H/D_{max}	L/D_{max}	Particle numbers	Remarks
	Height (H)	Length (L)						
1	4	6	0.298	1.5	13	20	376	Top ball clump friction angle=84.3°
2	12	18	0.298	1.5	40	60	3175	bottom wall friction angle=84.3°
3	20	30	0.298	1.5	67	101	8738	Side walls friction angle=24°
4	20	100	0.298	5	67	336	29259	

表 4.1.2 顆粒輸入摩擦角與直剪輸出摩擦角回歸參數

parameters	shear box dimensions (cm x cm)			
	20 x 100	20 x 30	12 x 18	4 x 6
y0	5.50	9.28	9.22	15.76
a	3.63	3.38	4.60	6.13
b	0.49	0.51	0.46	0.37

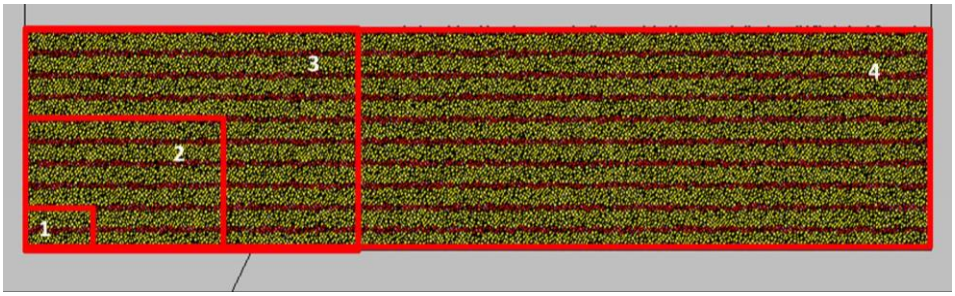


圖 4.1.12 PFC 直剪試驗模擬模型與斷層錯動實驗之數值模型關係

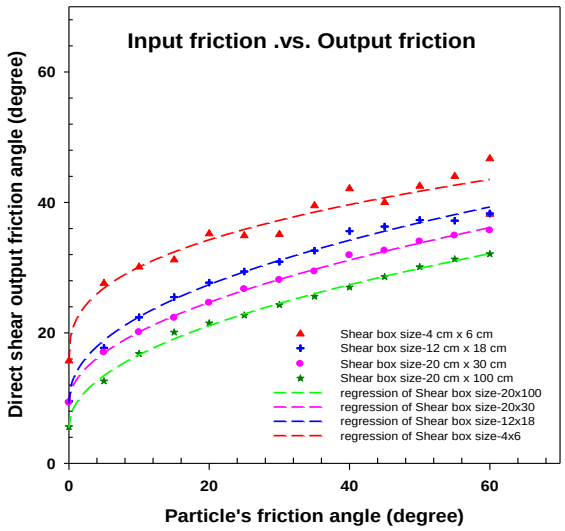


圖 4.1.13 顆粒輸入摩擦角與直剪輸出摩擦角關係圖

4.1.4 直剪數值模擬中外盒之尺寸效應

由於本研究中採用離散元素法進行斷層錯動之模擬，因此對於數值模擬中所使用之離散元素(或圓柱體)，需先行利用標準力學試驗，以求得其基本力學性質，如其內摩擦角等。研究中，主要使用數值分析以模擬之直剪試驗進行，直剪試驗在美國材料試驗標準(ASTM D-3080)中，說明其直剪盒寬需至少為 5 公分或試驗土樣最大粒徑之 10 倍，且直剪盒之寬高比至少為 2。

以離散元素法進行模擬所需參數與模擬圓柱體之勁度以及表面摩擦係數有關，而對於斷層錯動之模擬而言，反而是土層之力學性質(如土壤之內摩擦角)為較易取得之參數(由經驗公式、現地試驗資料或室內試驗求得等)，因此，本研究利用直剪試驗之離散元素模擬，藉由給定模擬直剪試體之微觀參數，進行直剪試驗模擬，以取得其相對應之力學參數；而由先前所建立之參數表中得知，摩擦角與顆粒尺寸有一定之關係，但直剪模擬中試體的尺寸效應可能會影響到所得到之剪力強度，若直剪盒相對於顆粒尺寸過大的話，剪力盒邊界可能會使土壤的變形和強度行為有局部集中的現象，據此，Wang and Gutierrez(2010)提出二維離散元素法模擬直剪試體砂顆粒的尺寸效應探討。Wang and Gutierrez(2010)的尺寸效應研究中，針對試體長(L)、試體高(H)與試體最大與最小粒徑比(D_{max}/D_{min})參數進行改變，並觀察上述變因對尖峰應力比、接觸力分布與剪應變分布的影響。文獻中分為兩種顆粒尺寸分布類型，不良級配(D_{max}/D_{min} = 1)與優良級配(D_{max}/D_{min} = 3)，圖 4.1.14 為優良級配、正向應力 100kPa 與盒高 14mm 下，不同盒長狀況對應之應力比與剪動位移關係圖，就這一組試驗而言，盒長為 35mm，相較於其他兩種盒長下，尖峰剪應力值最高且有明顯的尖峰剪應力值；圖 4.1.15 為不同盒長對試體內接觸力分布的影響，圖 4.1.15(a)、(b)為盒長 35mm 與 63mm，圖中可以看到接觸力以斜向分布，而圖(c)盒長 88mm 接觸力分布並無明顯趨勢，且較為混亂；圖 4.1.16 為不同盒長對直剪盒內剪應變分布的影響，可以看到圖 4.1.16(a)盒長 35mm，剪應變大多分布於剪動帶上，而隨著盒長增加，剪應變分布至整個直剪盒，此不均勻之接觸力分布或應變較大區域發生在剪力盒邊界的現象，可能會導致試體內產生局部破壞，使破壞無法沿著剪動帶發生。除了改變盒長外，文獻中也有對不同盒高、不同粒徑尺寸對剪應力比、接觸力分布與剪應變分布做分析比較，綜合模擬結果作者歸納出：L/D_{max}(盒長與最大粒徑比值)最小值為 60，H/D_{max}(盒高與最大粒徑比值)最小值為 40，L/H(直剪盒長度與高度比)的範圍為 1.5 到 2 之間時，可避免局部破壞發生，且使二維離散元素法模擬砂顆粒的直剪試驗結果較為合理。

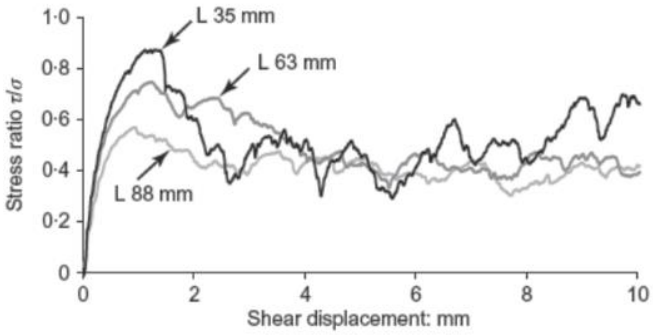


圖 4.1.14 不同盒長對應力比與剪動位移關係圖(Wang & Gutierrez，2010)

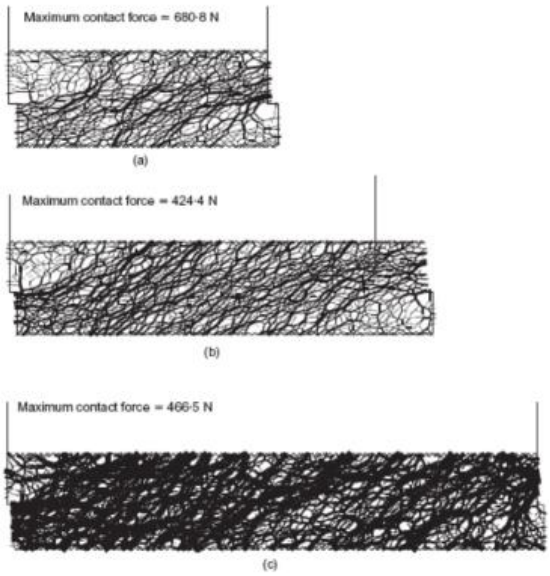


圖 4.1.15 不同盒長對試體內接觸力分布的影響(Wang & Gutierrez，2010)

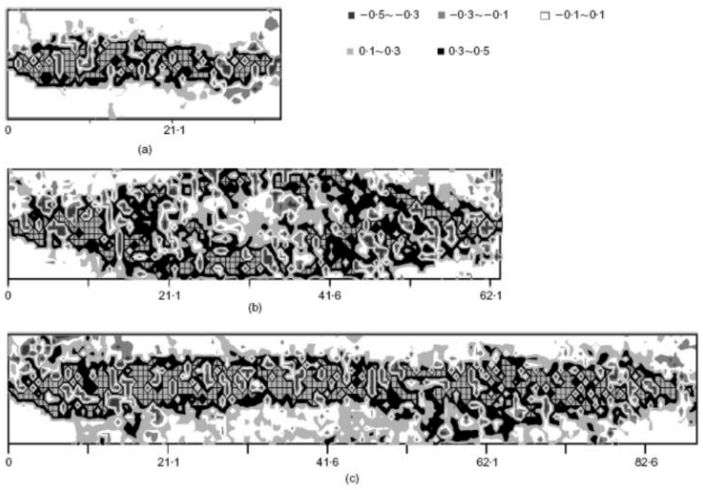


圖 4.1.16 不同盒長對直剪盒內剪應變分布的影響(Wang & Gutierrez，2010)

4.1.5 以直剪實數值模擬求取砂土試體之巨觀參數

圖 4.1.17(a)及(b)為 PFC 直剪試驗模擬模型初始狀態及剪動完成後之狀態。

模型剪動位移 2.7cm，其剪動長度為模型長度的 15%。直剪試驗模擬模型剪動期間顆粒的狀態諸如顆粒位置、顆粒旋轉量、顆粒所受之應力等均可由 PFC 計算結果，經過後處理方式獲得。圖 4.1.18(a)~(g)為 PFC 模擬所求得之剪應力、垂直應力、應力比、垂直沉陷量、膨脹角及摩擦角之圖形。圖 4.1.18(c)為剪應力及剪位移關係圖，由圖中可看出最大之剪應力出現在剪位移為 2mm~3mm 之間，並經由圖 4.1.18(g)之回歸，可得試驗模型之摩擦角約為 32°。由圖 4.1.18(e)剪位移和垂直沉陷之回歸，可得一回歸方程式，再將該方程式微分則可得膨脹角之方程式。在垂直應力分別為 50 kPa、100 kPa 及 150 kPa 下，試驗模型之膨脹角分別為 19°、16.7°及 13.8°(如表 4.1.3 所示)。

將 PFC 顆粒之應力資料，以 Matlab(分析網格 60mm x 10mm，如圖 4.1.19 所示)做後處理，將網格元素內之顆粒應力透過方程式 $\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V}\sum_{N_p} \bar{\sigma}_{ij}^{(p)} V^{(p)}$ ，以平均應力之方式求得各網格元素內顆粒之平均應力σ_{11}、σ_{12}、σ_{21}、σ_{22}。再藉由方程式 $\sigma_1 = \frac{\sigma_{11}+\sigma_{22}}{2} + \sqrt{(\frac{\sigma_{11}-\sigma_{22}}{2})^2 + (\sigma_{12})^2}$ 及 $\sigma_2 = \frac{\sigma_{11}+\sigma_{22}}{2} - \sqrt{(\frac{\sigma_{11}-\sigma_{22}}{2})^2 + (\sigma_{12})^2}$，可以將各網格元素內最大及最小主應力求出。

以 Matlab(網格元素 60mm x 10mm)方式，所求得之 PFC 直剪模擬錯動後(垂直應力為 50kPa、100kPa 及 150kPa)，各網格內 Q/P 比值之落點圖如圖 4.1.20(a)所示其中 $Q = \frac{\sigma_1-\sigma_2}{2}$，$P = \frac{\sigma_1+\sigma_2}{2}$。由圖 4.1.20(b)得直剪模擬所得之摩擦角為 $\emptyset_{peak} = \tan^{-1}(0.6397) \cong 31.9°$。由方程式 $\sin\emptyset = \tan\alpha$，再 Q/P 座標上以 α 角表示，則$\alpha = \tan^{-1}(0.528) \cong 27.9°$。於圖 2.1.4.4-1 (a)繪一直線其角度為 27.9°且通過圓點則可得於圖 4.1.20(b)，並可得其回歸方程式為 Q=0.528 P。從圖 4.1.20(b)可看出由垂直應力回歸所得到之摩擦角與以應力 Q/P 方式所得之摩擦角相吻合。

如圖 4.1.20(a)~(d)中，青色代表垂直應力加載為 50kPa、藍色代表垂直應力加載為 100kPa、紅色代表垂直應力加載為 150kPa。當 PFC 直剪模擬於剪動位移為 2.03mm~3.4mm 時，達到莫耳圓破壞狀態。由分析時中得知直剪盒下盒中間部位(網格元素 14 及網格元素 17)先達破壞狀態、上盒在中間部位網格元素 23 先

達破壞狀態，左側部位(網格元素 19)則隨後達破壞狀態。由圖 4.1.19 知，網格元素 14 位於下盒中間下方 1cm 處、網格元素 23 位於上盒中間上方 1cm 處。兩個網格元素之位置對稱於剪切面，於破壞時下盒 P 與 Q 值均大於上盒，但下盒與上盒之 Q/P 比值會落於某一區間內。

PFC 直剪模擬時，主應力面之角度會變化，以下盒中間網格元素 17 作為例(如表 4.1.4 及表 4.1.5)，於達到破壞狀態時，其主應力面旋轉角度介於 38.3°~44.3°間。由表 4.1.4 顯示，當模擬網格達到破壞狀態時，其 Q/P 比介於 0.53~0.57 間。

除了控制模擬中砂土試體之 Q/P 值之外，為了在模擬中控制砂土試體之摩擦角，並且突破過往摩擦角無法提升超過 30°之問題，本研究團隊嘗試一種嶄新的方式-固定旋轉(fix spin)，即在砂土試體中固定某一定比例的顆粒，使之無法旋轉，但仍可以自由的位移，此一作法乃突破 PFC 中模擬單元皆為圓球之限制，而視之如同真實世界中有菱有角的砂土顆粒，因為顆粒的不規則形狀而產生整體砂土的抗剪強度，即摩擦角。本研究嘗試固定旋轉之顆粒數分別佔整體顆粒數的 0%~100%，每相差 10%即進行一組直剪實驗以取求巨觀的摩擦角，其成果如圖 2.1.24 所示，可見當我們輸入不同的顆粒摩擦係數及固定不同比例的顆粒時，可以得到不同的砂土摩擦角，最大可以模擬至摩擦角為 70°~80°之砂土。

根據此一嶄新的方式，應用於斷層的數值模擬，比照直剪數值模擬中固定比例每隔 10%即進行一組斷層傾角為 22.5°之逆斷層模擬，成果如圖 4.1.25 所示，其中各圖分別代表固定比例為 0%~100%及其相對應之砂土摩擦角，可見在同一個斷層邊界條件之下，砂土之摩擦角對土層中之剪切帶位置及地表變形之形式都有相當大的影響。

表 4.1.3 50kPa~150kPa 膨脹角表

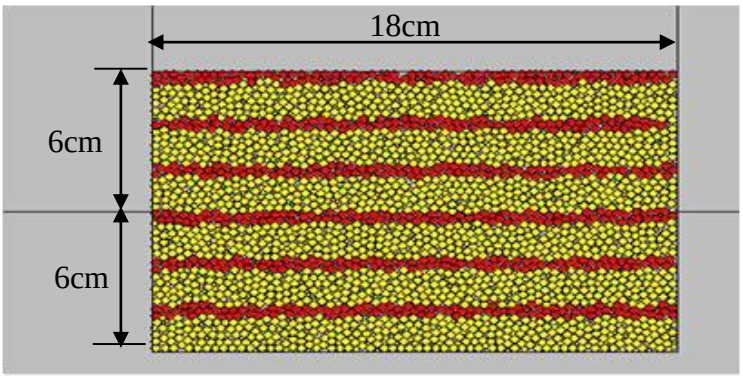
垂直應力（Kpa）	剪應力（kPa）	應力比	摩擦角（度）	膨脹角 φ_{peak}（度）	位移量（mm）	位移量/模型長度（%）
62.4	40.9	0.66	33.3	19.0	1.9	1.03
121.1	78.4	0.65	32.9	16.7	3.3	1.81
171.0	108.4	0.63	32.4	13.8	2.9	1.60

表 4.1.4 網格元素 17 於垂直應力 50 kPa~150 kPa 下主應力面旋轉表

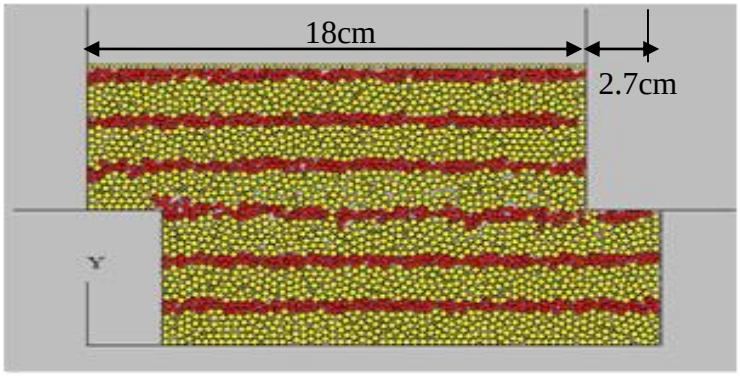
Steps	Displacement (mm)	Major stress plane rotation (degree)-50kPa	Major stress plane rotation (degree)-100kPa	Major stress plane rotation (degree)-150kPa
1	0.7	40.9	46.6	52.5
2	1.4	39.9	41.4	44.3
3	2.0	38.3	38.6	40.7
4	2.7	37.0	38.4	37.8
5	3.4	35.8	38.1	37.3
6	4.1	33.8	37.5	37.8
7	4.7	33.4	38.1	39.9
8	5.4	36.9	42.0	41.5
9	6.1	44.2	44.3	42.2
10	6.8	46.3	49.9	42.3
11	7.4	45.2	47.3	41.2
12	8.1	41.8	45.0	41.7
13	8.8	41.9	69.5	43.2
14	9.5	36.8	65.3	38.4
15	10.1	24.5	57.5	36.0
16	10.8	28.5	54.0	34.9
17	11.5	32.0	59.3	35.5
18	12.2	32.2	60.9	33.7
19	12.8	30.5	56.3	31.7
20	13.5	39.0	57.2	32.0
21	14.2	46.1	59.7	32.4
22	14.9	41.1	56.1	37.7
23	15.5	38.5	50.3	38.9
24	16.2	46.4	45.5	37.4
25	16.9	50.6	41.2	38.0
26	17.6	54.4	45.3	39.9
27	18.2	54.1	54.1	41.6
28	18.9	51.3	44.1	42.1
29	19.6	46.3	44.0	42.8
30	20.3	47.4	46.3	46.9
31	20.9	45.5	38.9	45.8
32	21.6	42.0	40.5	39.6
33	22.3	43.5	41.1	31.3
34	23.0	40.5	44.9	38.6
35	23.6	42.4	36.0	48.7
36	24.3	41.1	39.1	37.9
37	25.0	41.6	47.5	52.4
38	25.7	46.6	50.6	46.8
39	26.3	38.9	54.5	37.6
40	27.0	32.1	54.6	31.4

表 4.1.5 各網格元素 50kPa~150kPa 主應力及其比值

Mesh No.	50kPa			100kPa			150kPa		
	P (kPa)	Q (kPa)	Ratio	P (kPa)	Q (kPa)	Ratio	P (kPa)	Q (kPa)	Ratio
1	57.89	13.28	0.23	95.25	26.08	0.27	138.70	42.91	0.31
2	49.38	17.11	0.35	82.72	30.47	0.37	115.55	47.59	0.41
3	34.27	7.32	0.21	52.55	12.54	0.24	71.16	18.61	0.26
4	57.36	12.75	0.22	97.66	25.96	0.27	146.43	43.19	0.29
5	56.24	19.74	0.35	95.55	36.32	0.38	136.34	57.72	0.42
6	41.51	13.93	0.34	63.94	22.09	0.35	87.88	29.56	0.34
7	72.86	17.14	0.24	121.42	30.48	0.25	183.66	49.65	0.27
8	55.72	24.44	0.44	96.07	43.50	0.45	141.38	66.80	0.47
9	41.49	15.39	0.37	64.02	25.25	0.39	88.70	35.59	0.40
10	70.32	21.47	0.31	120.28	36.19	0.30	185.62	57.42	0.31
11	60.66	29.48	0.49	106.33	50.26	0.47	156.33	78.73	0.50
12	40.27	13.02	0.32	67.65	22.89	0.34	94.52	34.60	0.37
13	75.66	24.66	0.33	129.89	36.67	0.28	203.52	63.11	0.31
14	67.14	37.21	0.55	116.18	62.14	0.53	177.41	95.63	0.54
15	46.09	20.88	0.45	74.62	35.30	0.47	111.75	50.99	0.46
16	71.68	32.66	0.46	120.37	47.04	0.39	193.35	82.05	0.42
17	56.39	31.84	0.56	102.10	55.02	0.54	163.28	90.52	0.55
18	62.73	29.91	0.48	105.03	51.24	0.49	162.87	77.32	0.47
19	52.20	26.01	0.50	84.26	41.48	0.49	127.27	68.22	0.54
20	69.18	33.72	0.49	113.11	51.55	0.46	169.86	82.43	0.49
21	77.44	37.35	0.48	125.16	58.34	0.47	189.45	90.84	0.48
22	41.96	17.42	0.42	74.53	30.95	0.42	112.73	53.46	0.47
23	52.52	28.28	0.54	88.63	47.40	0.53	135.49	72.57	0.54
24	72.30	25.01	0.35	122.65	38.17	0.31	187.36	63.79	0.34
25	33.99	11.29	0.33	62.35	22.43	0.36	86.19	35.98	0.42
26	56.17	25.27	0.45	96.23	41.95	0.44	145.20	68.03	0.47
27	77.05	26.03	0.34	128.82	33.60	0.26	192.24	53.84	0.28
28	22.60	6.01	0.27	46.39	17.02	0.37	72.57	32.19	0.44
29	60.96	22.17	0.36	103.77	35.90	0.35	149.71	55.84	0.37
30	73.34	19.34	0.26	126.38	24.73	0.20	186.66	40.45	0.22
31	22.52	3.68	0.16	43.16	15.66	0.36	61.66	26.66	0.43
32	47.16	16.89	0.36	82.89	30.28	0.37	124.44	48.37	0.39
33	69.35	16.61	0.24	120.14	23.47	0.20	174.70	34.83	0.20
34	18.43	3.93	0.21	43.14	12.07	0.28	63.62	20.63	0.32
35	45.41	10.11	0.22	82.49	18.07	0.22	120.95	31.31	0.26
36	50.78	15.10	0.30	100.32	29.15	0.29	149.59	43.20	0.29

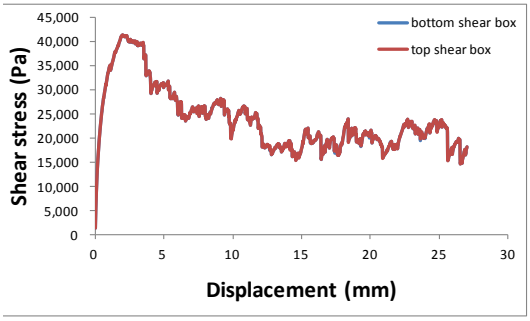


(a)PFC 直剪試驗模擬初始模型

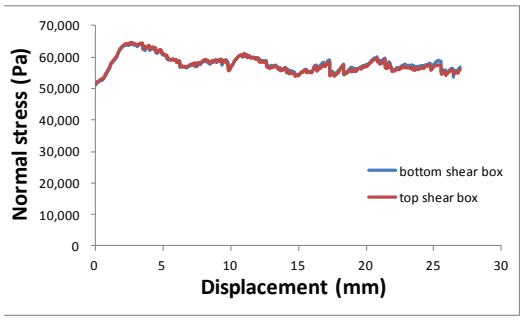


(b)PFC 直剪試驗模擬剪動完成後模型

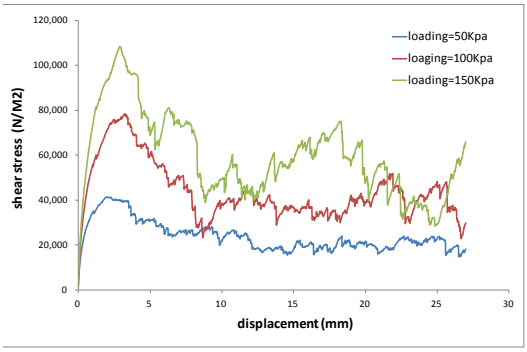
圖 4.1.17 PFC 直剪試驗數值模擬



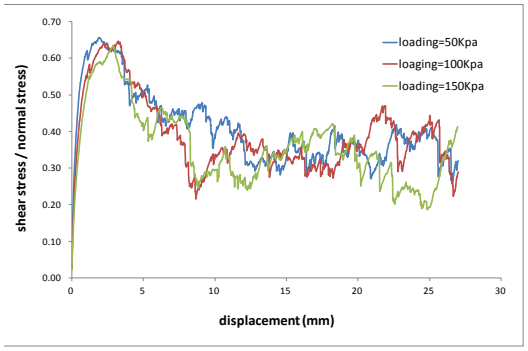
(a)剪應力



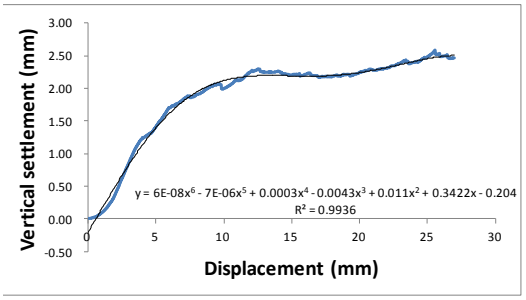
(b)垂直應力



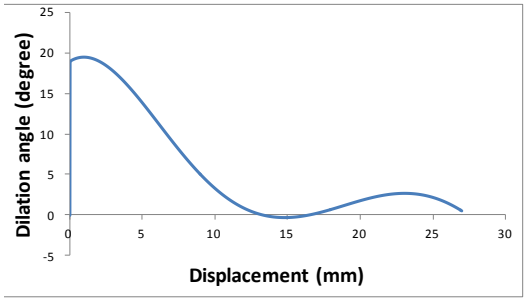
(c)50-150kPa 剪應力



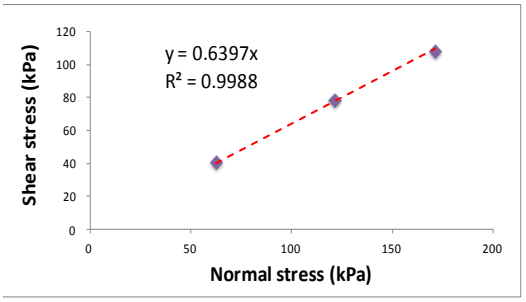
(d)50-150kPa 應力比



(e)垂直沉陷回歸



膨脹角與剪位移關係

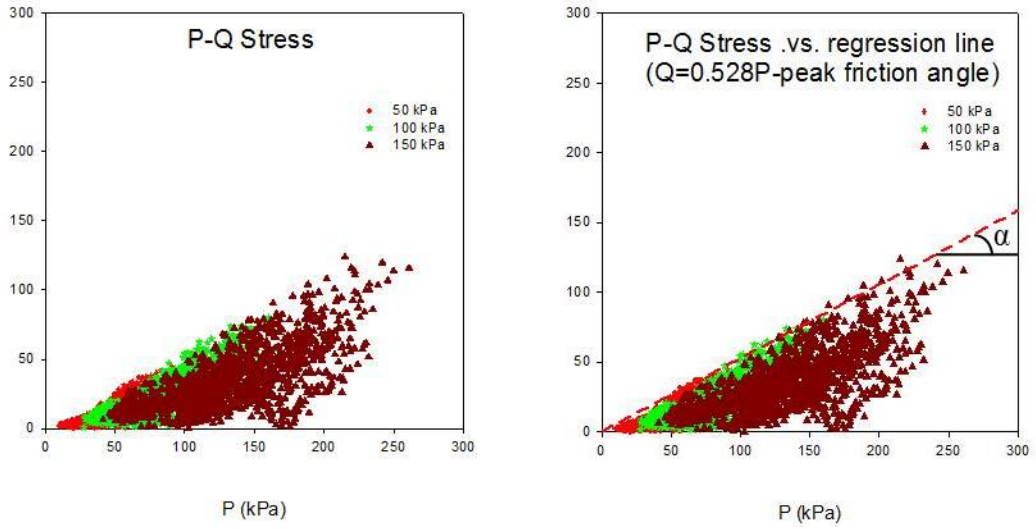


(g)摩擦角

圖 4.1.18 PFC 直剪試驗數值模擬取得之巨觀參數

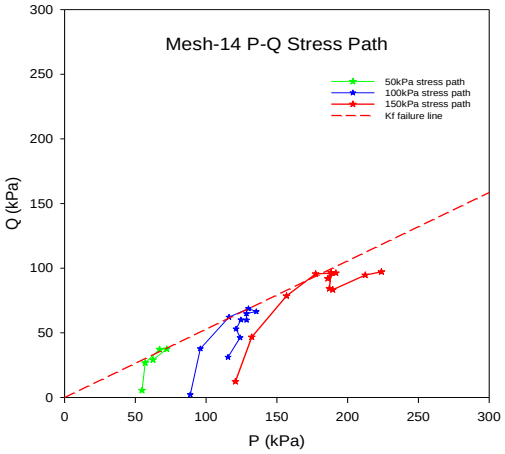
34	35	36
31	32	33
28	29	30
25	26	27
22	23	24
19	20	21
16	17	18
13	14	15
10	11	12
7	8	9
4	5	6
1	2	3

圖 4.1.19 剪力盒分析單元網格示意圖

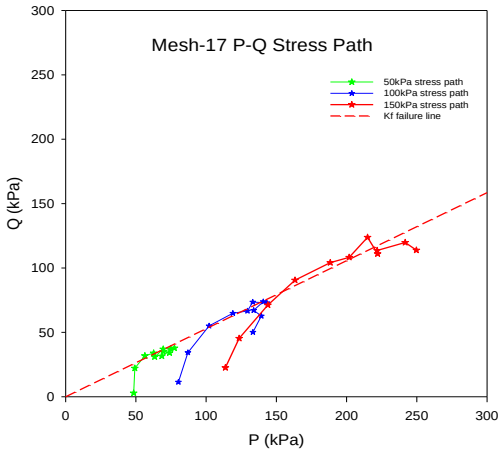


(a)Q/P 比值之落點圖　　(b)Q/P 比值與摩擦角回歸比較圖

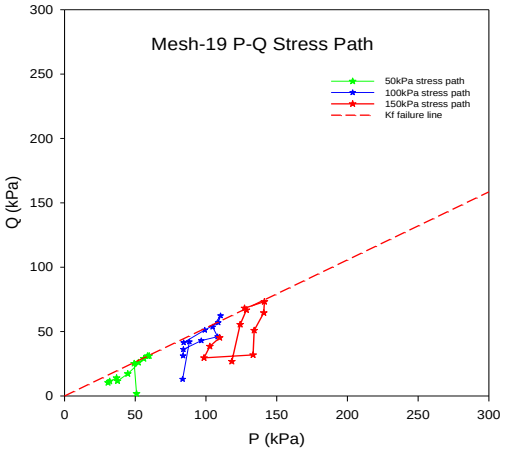
圖 4.1.20 PFC 直剪試驗數值模擬 Q/P 比值之落點圖



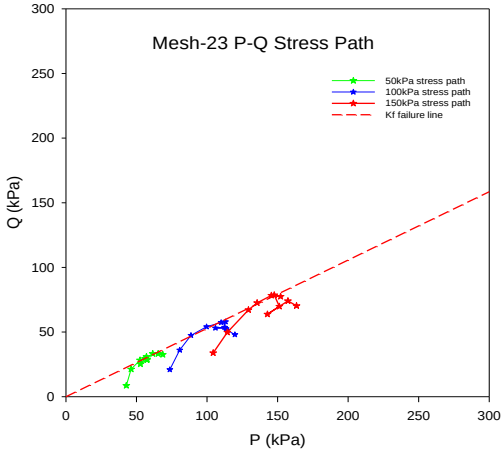
(a)網格元素 14 應力路徑



(b)網格元素 17 應力路徑



(c)網格元素 19 應力路徑



(d)網格元素 23 應力路徑

圖 4.1.21 PFC 直剪試驗數值模擬網格元素應力路徑

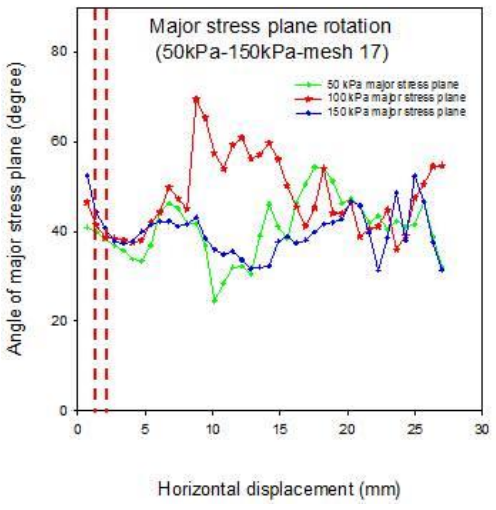


圖 4.1.22 主應力面旋轉圖

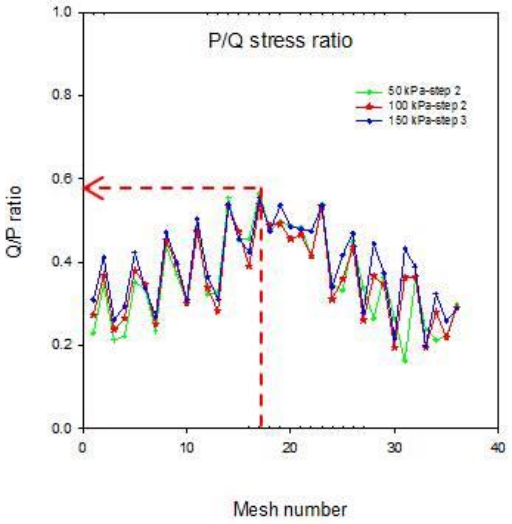


圖 4.1.23 各網格元素主應力比值

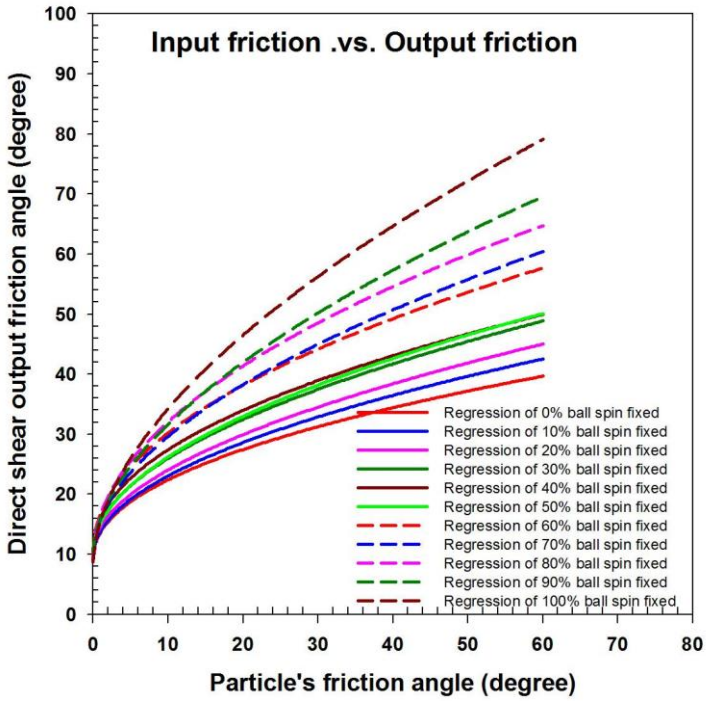


圖 4.1.24 顆粒摩擦係數及固定旋轉比例對巨觀砂土摩擦角之影響

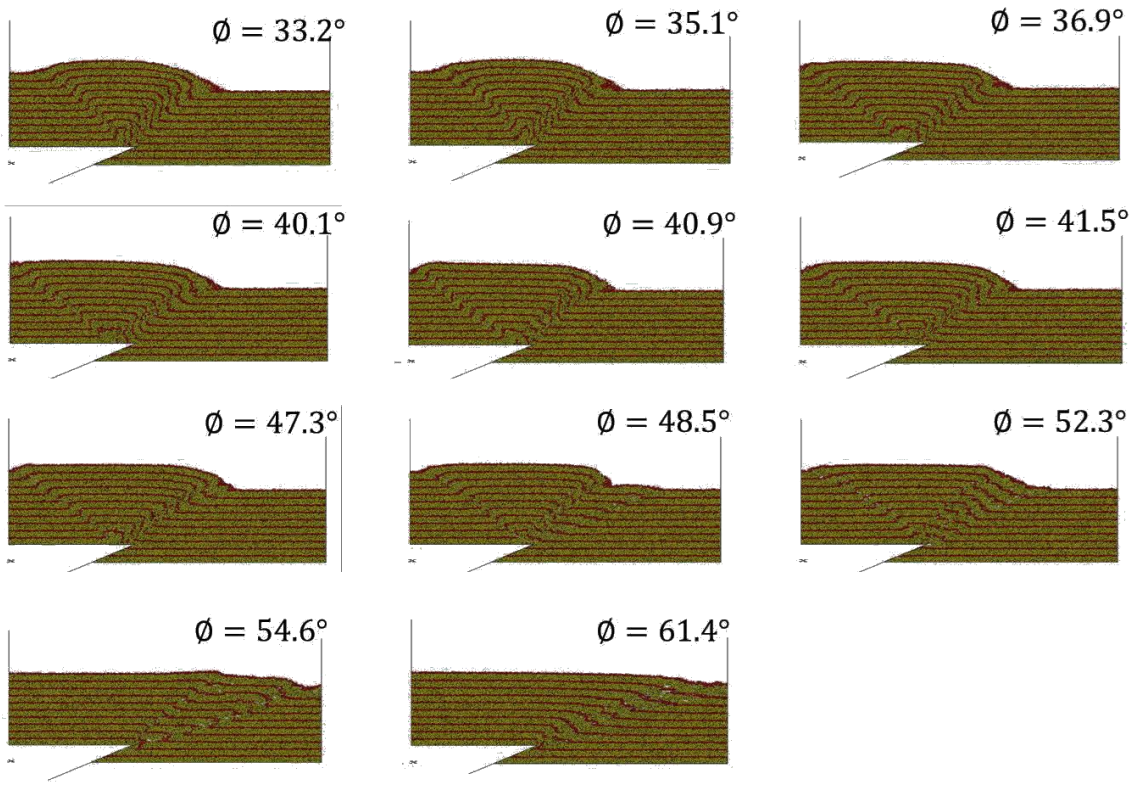


圖 4.1.25 不同巨觀砂土摩擦角對剪切帶的影響

4.2 由數值模擬推測剪切帶之方法

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 4.2.1 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)。

4.3 生長斷層的數值模擬及推測剪切帶之方法

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 4.3.1，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 4.3.2 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 4.3.3 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。

山腳斷層上盤之基盤深度 675m(五股剖面)，169 層之模擬結果如圖 4.3.4 所示，圖 4.3.5 為局部放大。由圖 4.3.5 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 4.3.1 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 4.3.1 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 4.3.6~圖 4.3.10 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 4.3.6 所做用之橢圓率門檻值為黏為東(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 4.3.7(橢圓率門檻值 1.1，γ = 9.5%)及圖 4.3.8(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 4.3.9(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 4.3.10 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 4.3.8 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 4.3.11 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。

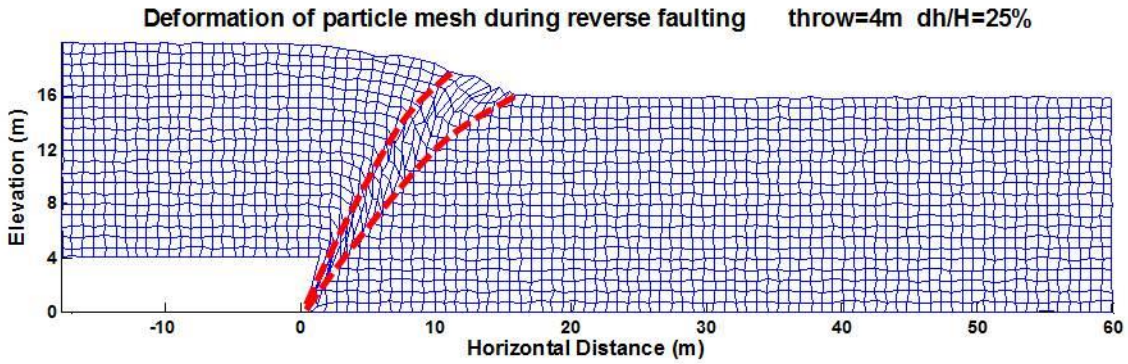


圖 4.2.1 數值模擬逆斷層錯動地下破裂跡之決定

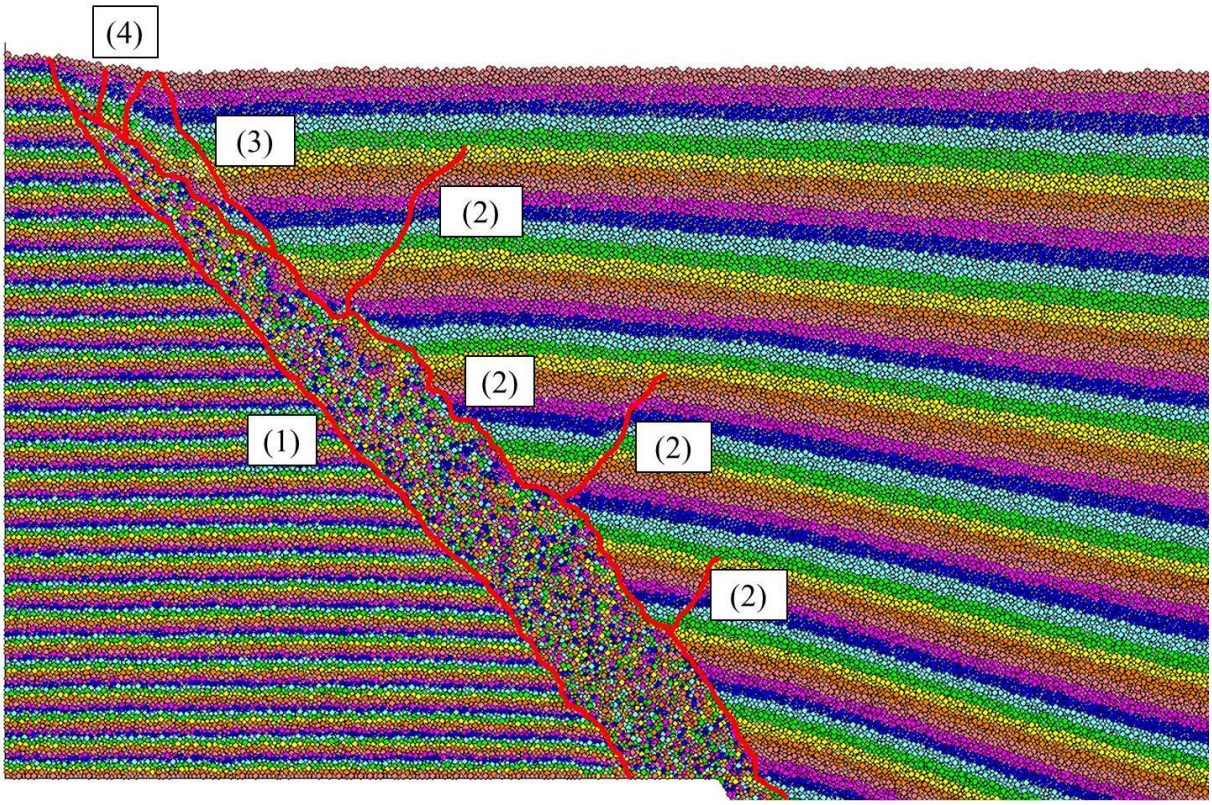


圖 4.3.1 生長斷層數值模擬中以人工判識圈繪剪切帶

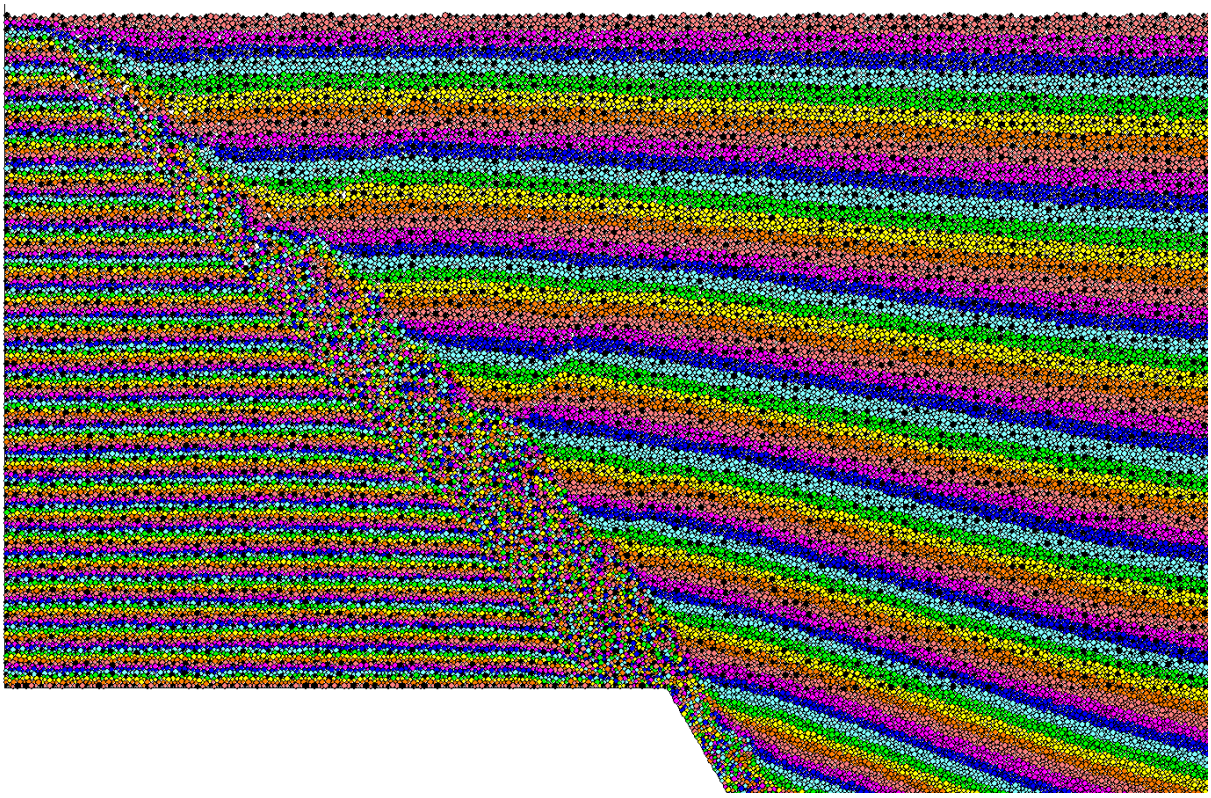


圖 4.3.2 在生長斷層數值模擬中設置監測點

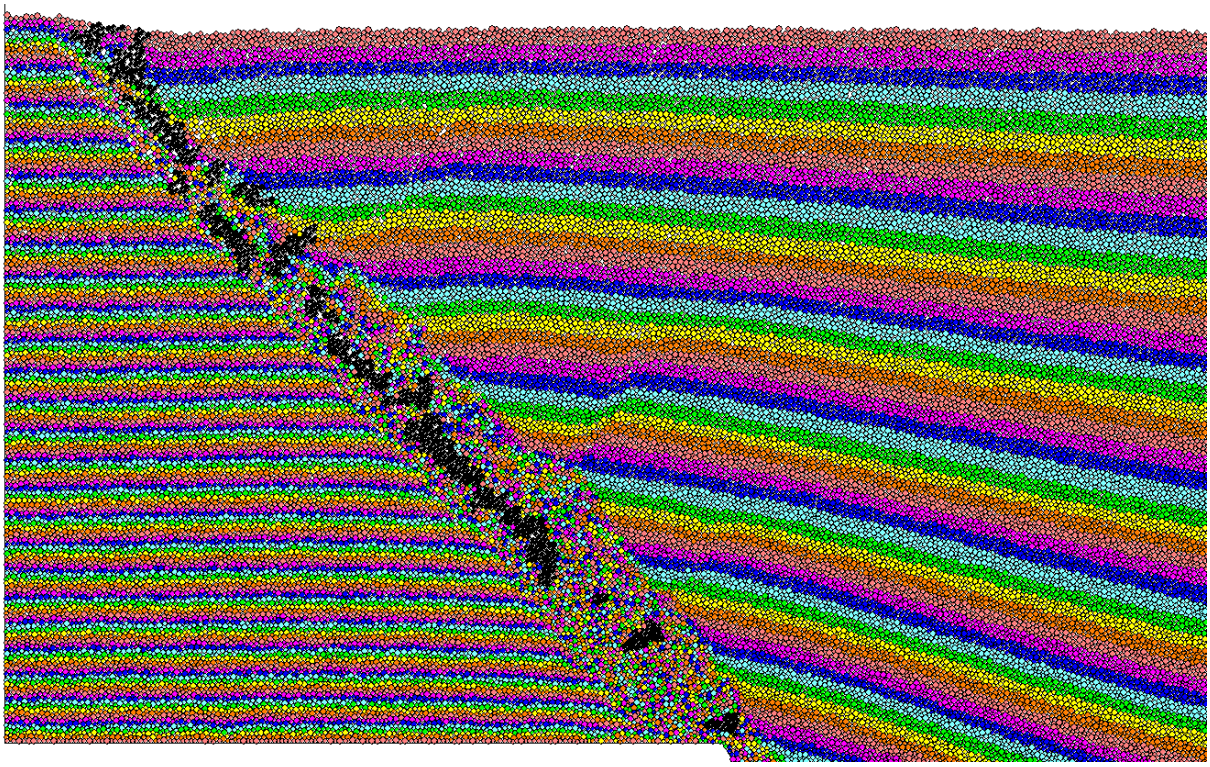


圖 4.3.3 生長斷層數值模擬中以自動判識圈繪剪切帶(建議橢圓率門檻值 1.5，γ＝41%)

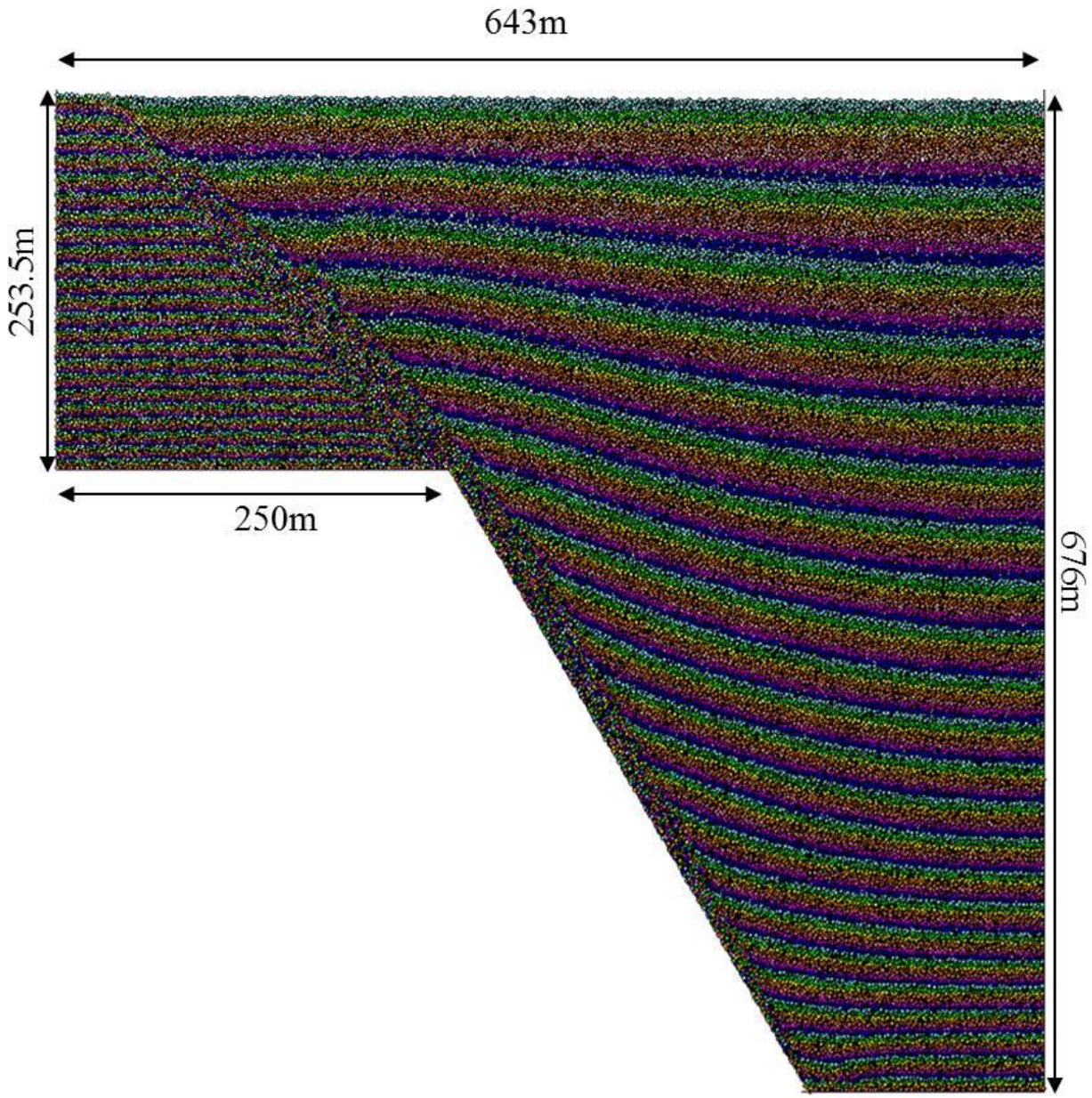


圖 4.3.4 169 層生長斷層數值模擬

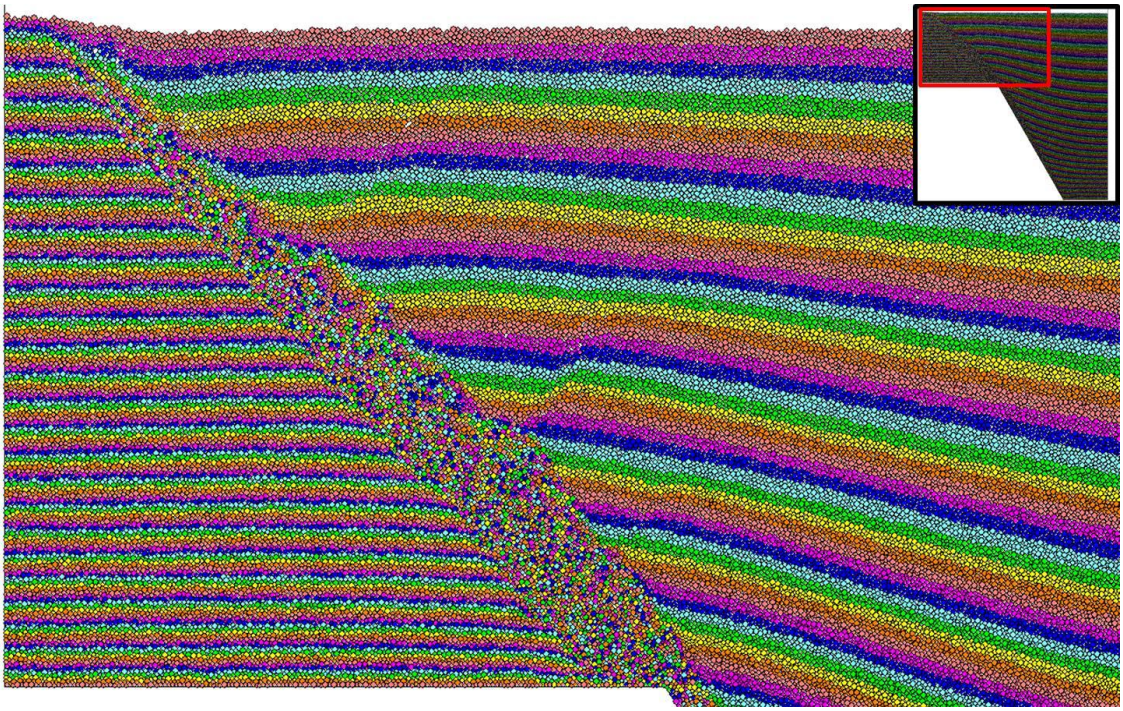


圖 4.3.5 169 層生長斷層數值模擬結果

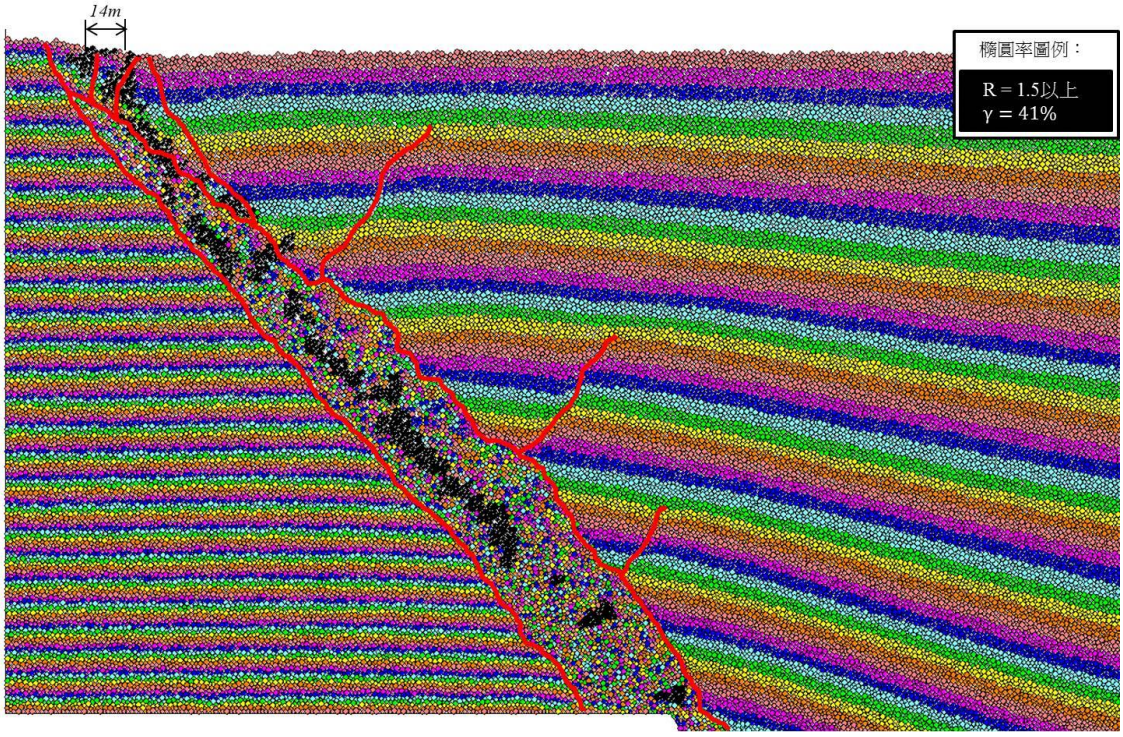


圖 4.3.6 169 層生長層錯動時所形成的剪切帶(橢圓率門檻值 1.5)

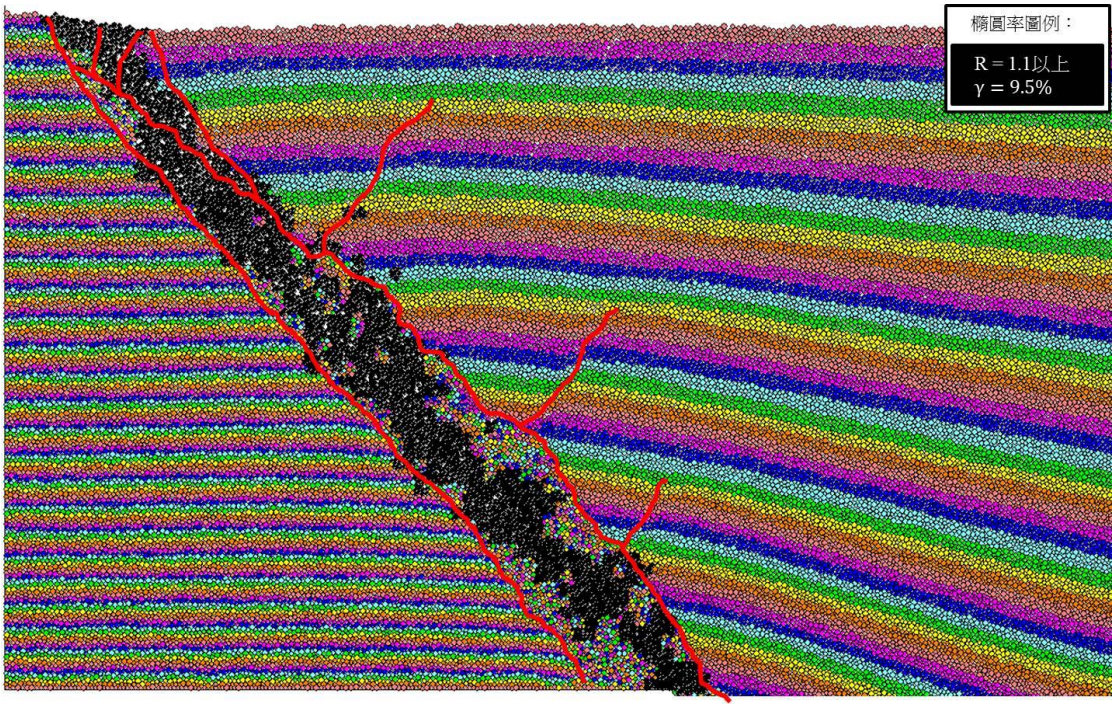


圖 4.3.7 169 層生長層錯動時所形成的剪切帶(橢圓率門檻值 1.1)

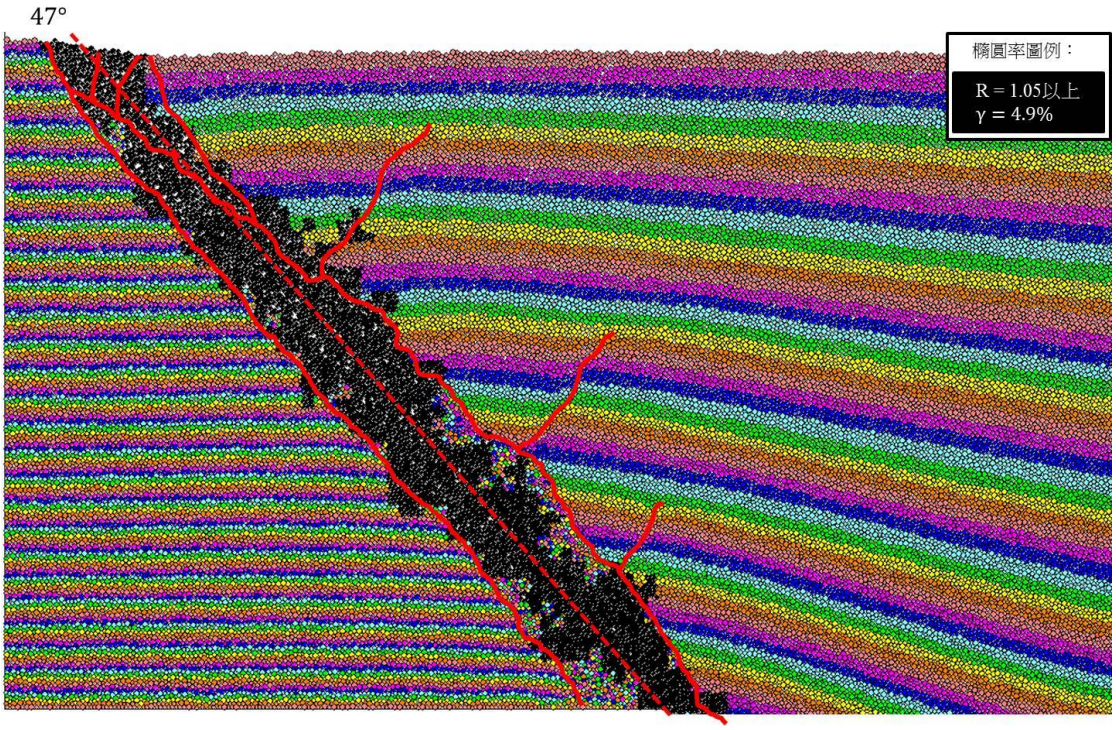


圖 4.3.8 169 層生長層錯動時所形成的剪切帶(橢圓率門檻值 1.05)

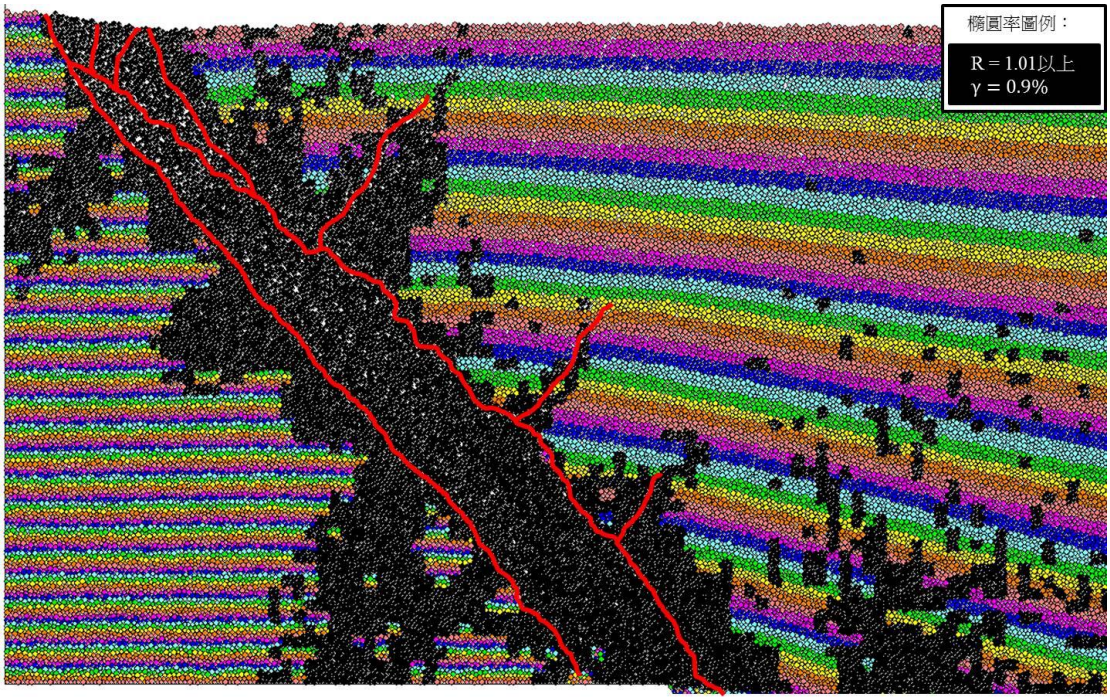


圖 4.3.9 169 層生長層錯動時所形成的剪切帶(橢圓率門檻值 1.01)

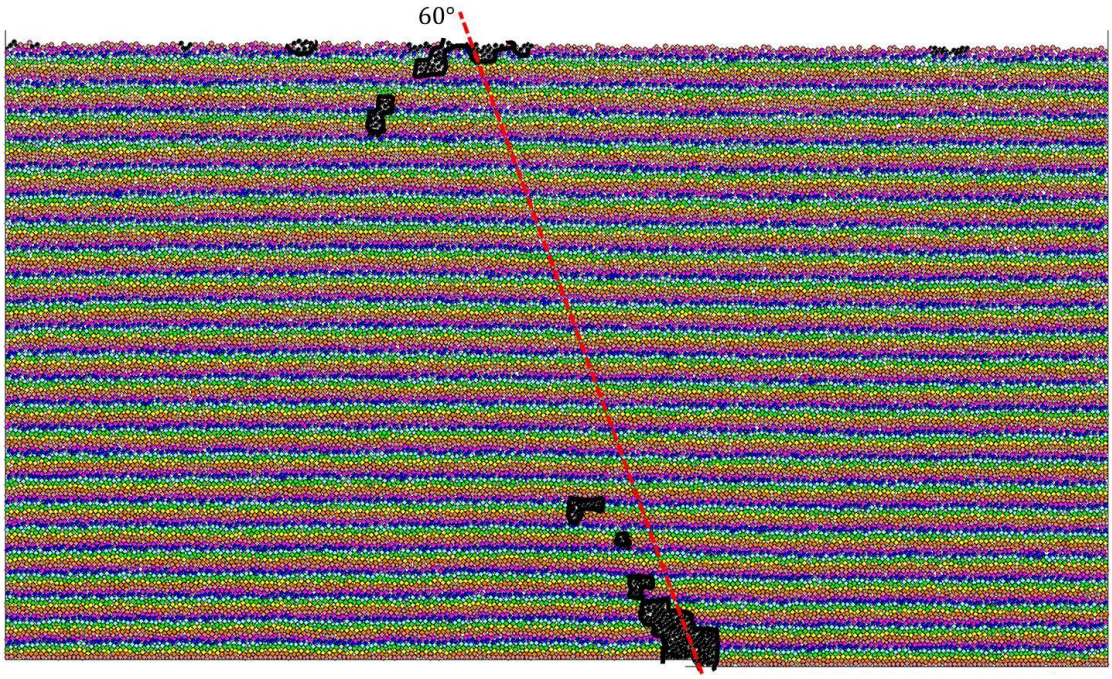
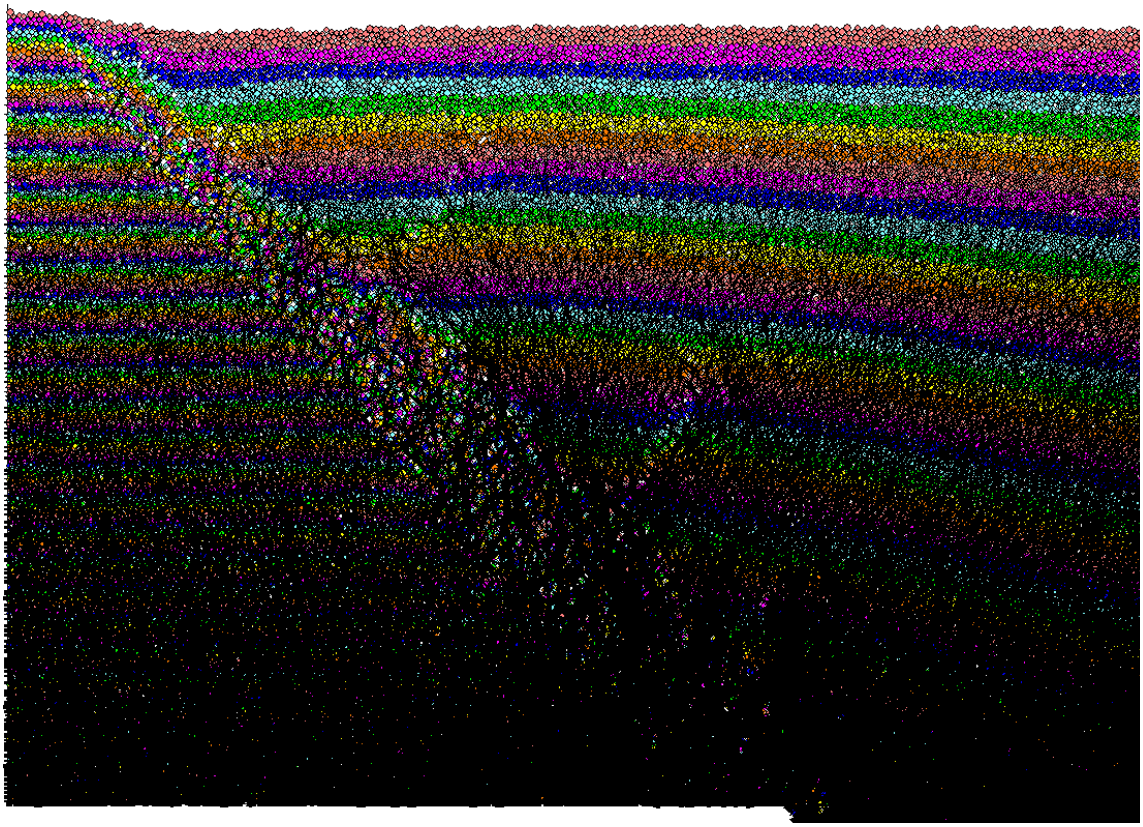
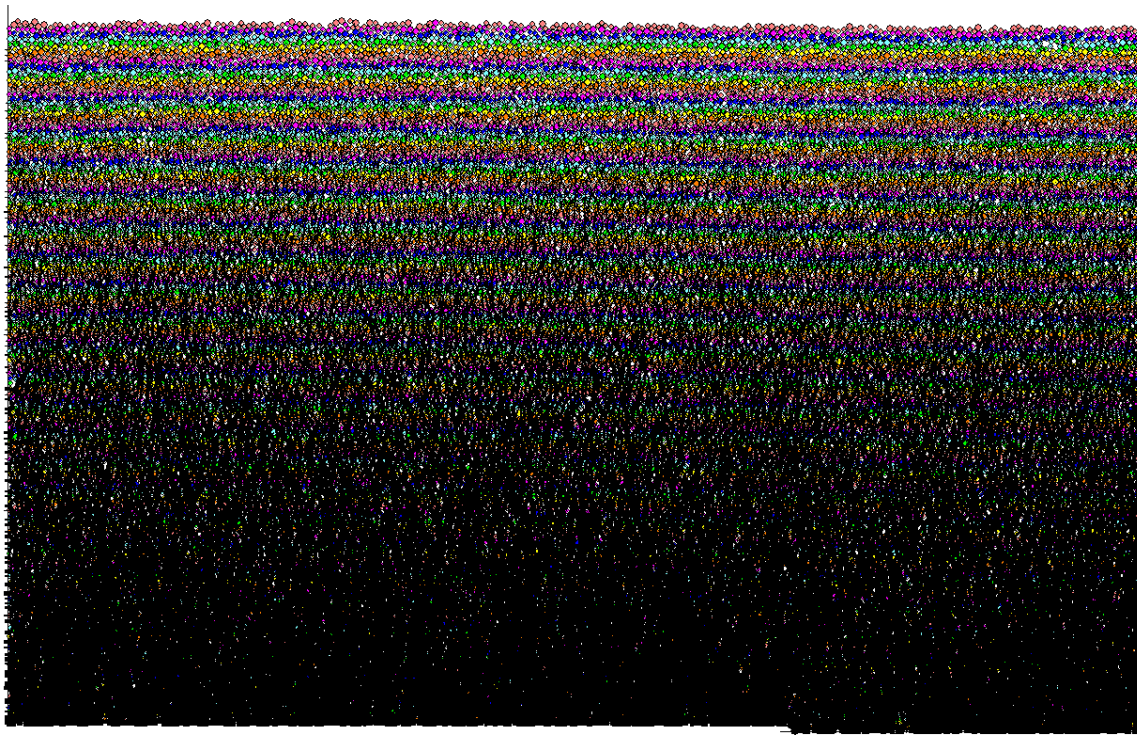


圖 4.3.10 與 169 層生長斷層比對之正斷層(相同微觀參數及下盤覆土厚度)



(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 4.3.11 169 層生長斷層及正斷層數值模擬顆粒接觸力(Contact Force)分佈情形

第五章、地表變形之影響範圍

綜合上述室內砂箱試驗及數值模擬，可了解斷層錯動引致地表變形範圍受控於斷層類型，本計畫優先選定台灣大地應力作用下，較顯著活動的傾向滑移斷層：逆斷層及正斷層，討論地表影響範圍，為了建立活動斷層影響範圍之圖表，進行 60 度逆斷層地表變形剖面的砂箱試驗及數值模擬之效正及函數化建立，再利用多組不同斷層傾角形式及參數之正、逆斷層數值模擬，其參數矩陣如表 5.1.1 所示，而橫移斷層地表變形影響範圍討論，因實驗模型規劃，不易觀察影響範圍，故參考相關文獻綜合討論。

表 5.1.1 正逆斷層數值模擬參數矩陣

參數種類	使用參數或形式	
斷層形式	逆斷層	正斷層
斷層傾角	22.5°、30°、37.5°、45°、52.5°、60°、67.5°、75°、82.5°、90°	
土層厚度	15m	5m、10m、15m
砂土摩擦角	30°、33°、36°、40°	33°、35°、36°、40° 41°、47°、52°、60°

5.1 逆斷層地表變形剖面函數化的建立

逆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 5.1.1 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)之地表變形剖面以及地表變形剖面的斜率。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

可寫成

$$y(t) = ae^{be^{ct}} \qquad \text{式 5.1.1}$$

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。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 5.1.2)，Gompertz 函數可以改寫成

$$f(x) = y_o + ae^{-e^{\frac{-(x-x_o)}{b}}} \qquad \text{式 5.1.2}$$

其一次微分式可寫成

$$f'(x) = \frac{a}{b}\left[e^{-e^{-\left(\frac{x-x_0}{b}\right)}}\right]e^{-\left(\frac{x-x_o}{b}\right)} \qquad \text{式 5.1.3}$$

其中

f：Gompertz 方程式，代表之水平距離；

f'：代表地表變形斜率；

y0：代表下盤之高度(通常假設為 0) ；

x：指斷層尖端至地表上示任一點之水平距離；

x0：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 5.1.2 為利用 Gompertz 函數來描述正規化地表變形剖面及斜率之示意圖，其中待定的三個參數為x_o, a, b。利用 Gompertz 函數來描述地表變形剖面及其斜率。不同的地表變形剖面，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 等四個代表該函數的參數。

圖 5.1.3 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 5.1.2 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，地表變形剖面的函數，可僅以 a、b、x0 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 5.1.3)，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

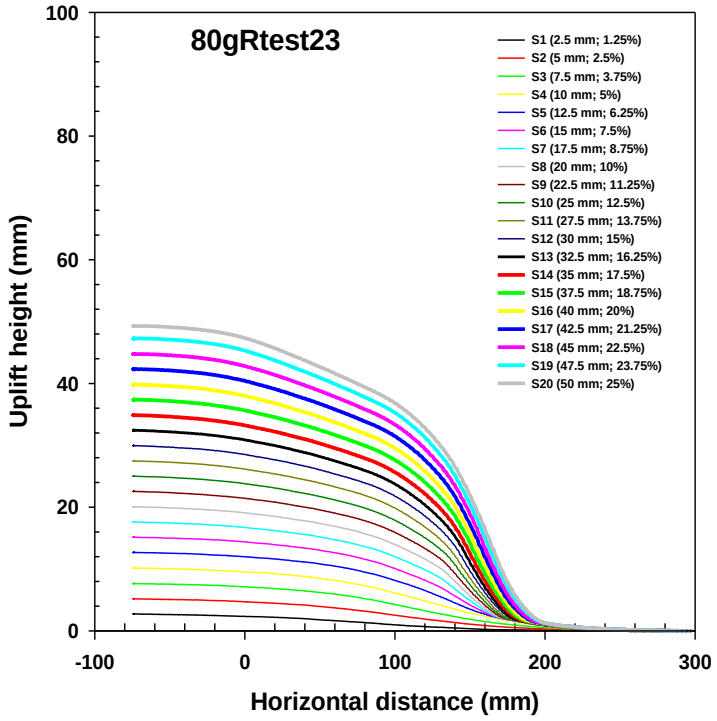
方程式(2)，則可求得 x_1 與 x_2 值(如圖 5.1.4 所示)，則 x_1 與 x_2 間之距離定義為斷層錯動後地表變形的影響範圍。

表 5.1.2 80gRtest23 Gompertz 函數之回歸參數表

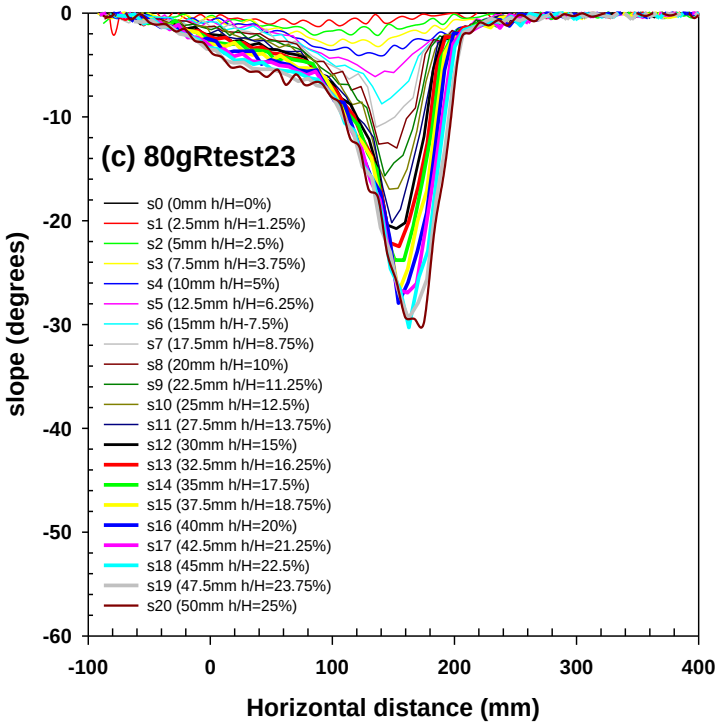
r (%) / 參數	5	10	15	20	25
a	0.0531	0.0995	0.1471	0.1951	0.2425
b	-0.2969	-0.2111	-0.1948	-0.198	-0.2091
x_0	0.684	0.7111	0.7306	0.7548	0.7774
y_0	-0.0002	-0.000045	-0.0002	-0.0003	-0.0006

表 5.1.3 角變量與建築物損壞程度(Bjerrum [a])

Category of potential damage	角變量 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	



(a)



(b)

圖 5.1.1 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)。(a)地表變位剖面；(b)地表變位剖面的斜率

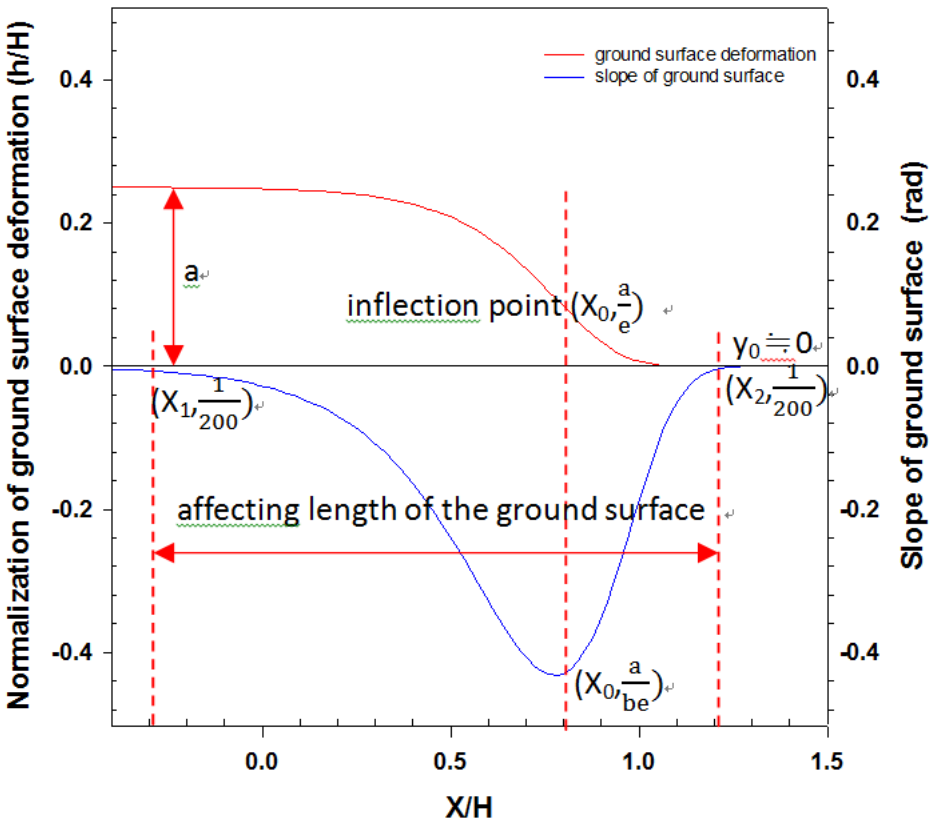


圖 5.1.2 利用 Gompertz 函數來描述地表變形剖面及斜率之示意圖

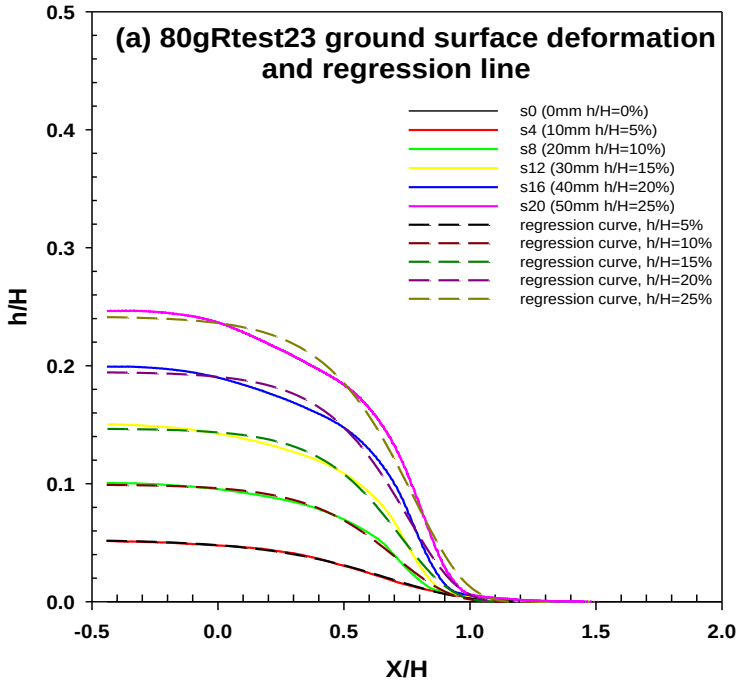


圖 5.1.3 逆斷層離心物理模型試驗地表變形剖面與 Gompertz 之回歸比較圖

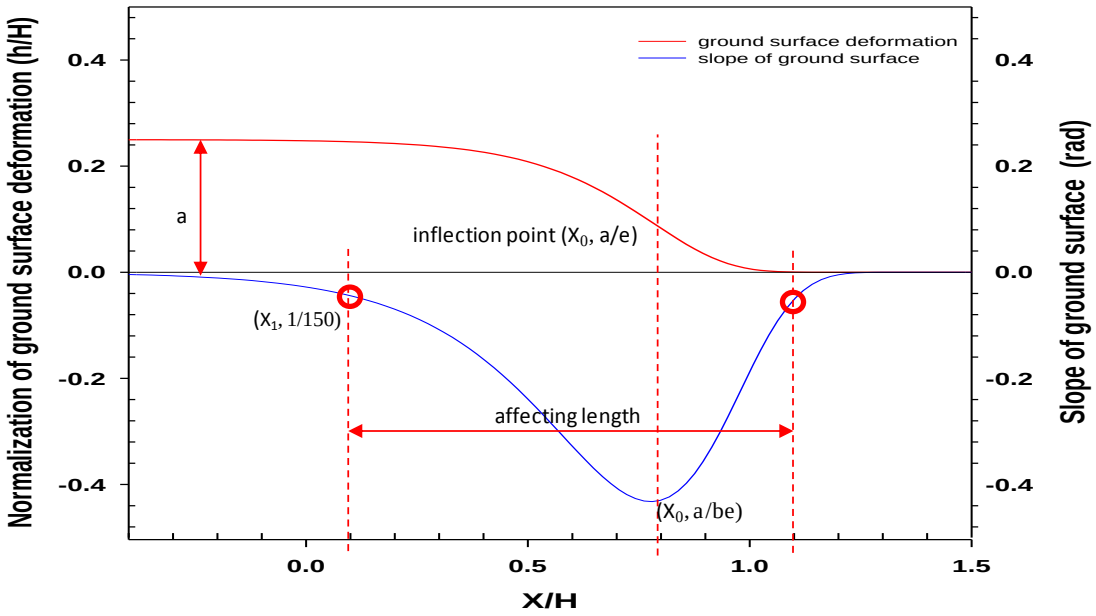


圖 5.1.4 逆斷層錯動後地表影響範圍之示意圖

5.2 逆斷層錯動後引致之地表變形之影響範圍

本節係以 PFC2D 來模擬不同傾角逆斷層的錯動，通過上覆砂土層或複合地盤所引致之地表變形剖面，並依據表 5.1.1PFC2D 模擬的物理參數作為分析之依據。模擬成果為逆斷層於不同的斷層傾角(dip angle)及垂直錯動量後之地表變形剖面。圖 5.2.1 為離心模型試驗與 PFC2D 數值模擬，因逆斷層錯動(斷層傾角=60^{o})，所產生之地表變形剖面比較圖，實線部分為離心模型試驗之地表變形剖面圖，而點線部分則為 PFC2D 數值模擬所得之地表變形剖面圖。h 表示基盤垂直抬升的高度，s 表示地表垂直抬升的高度，d 表示距離斷層傾角尖端(fault tip)之水平距離，若 d 落於斷層傾角尖端右側以正號表示，於斷層傾角尖端左側則以負號表示。圖 5.2.1 表示為基盤垂直錯動 h 分別為 10mm(於原型為 0.8m)、20mm(1.6m)、30mm(2.4m)、40mm(3.2m)及 50mm(4.0m)下之地表變形剖面圖，該圖顯示 PFC2D 模擬所得之地表變形剖面與離心模型試驗所量得之地表變形剖面相當一致。圖 5.2.2 為斷層傾角 60°時利用 Gompertz 曲線方程式與離心模型試驗成果及 PFC2D 模擬正規化地表變形剖面之比較圖。垂直座標為地表垂直錯動量，s，對覆土層厚度(H)之正規化 s/H，水平座標則為水平距離 d 對土層厚度(H)之正規化 d/H。

圖 5.2.2 為正規化基盤垂直錯動量，h/H(其中 h/H 以符號 r 表示)分別為 0.05、0.1、0.15、0.2 及 0.25 之正規化地表變形剖面，該圖顯示利用 Gompertz 函數可代表 PFC2D 模擬所得之地表變形剖面以及離心模型試驗之地表變形剖面。

Gompertz 函數(式 5.2.1)可用於描述地表變形剖面，若將(式 5.2.1)微分，則得方程式(式 18)，該方程式代表地表變形剖面的斜率。Gompertz 曲線方程式如下所示：

$$y = y_0 + ae^{-e^{\frac{-(x-x_0)}{b}}} \qquad \text{式 5.2.1}$$

$$y' = \frac{a}{b}[e^{-e^{-(\frac{x-x_0}{b})}}]e^{-(\frac{x-x_0}{b})} \qquad \text{式 5.2.2}$$

x = 離斷層傾角尖端(fault tip)之水平距離 d 對土層厚度(H)之正規化(d/H)

y = 水平正規化距離 d/H 下，地表垂直抬升量對土層厚度(H)正規化 s/H 值

y' =為於水平正規化距離 d/H 下之地表斜率值

y_0 = 地表未錯動時之 s/H 之值(本研究設定 yo= 0)

x_0 = 地表曲線反曲點離斷層傾角尖端(fault tip)之水平正規化距離，當$x = x_0$時 y= a/e

b = 為 Gompertz 地表曲線之斜率參數

a =為正規化後之上盤最大地表高程與未錯動前之地表高程差

e ≒ 2.7183.

圖 5.2.3 展示以 Gompertz 函數來表示地表變形剖面及地表變形剖面之斜率的示意圖，紅色曲線表示地表變形剖面、藍色則表示地表變形剖面之斜率。圖中θ max 可用來代表該斷層崖之最陡坡度。而該斜率與 s/H=0 線之交點，該位置與斷層傾角尖端(fault tip)之水平正規化距離為 $x_{outcropping}$。$x_{outcropping}$ 本研究定義為斷層出露於地表之位置。若將 f'值(地表變形剖面的斜率函數，Gompertz 函數的一次微分)設定於一固定值(本研究案設定為 1/150)，則可求得左右兩個邊界值 x_1、x_2，其中 x_1 表示逆斷層在上盤之影響範圍，而 x_2 表示在下盤之影響範圍，而介於 x_1 與 x_2 之間的距離，則可表示為地表受逆斷層錯動之影響範圍。

在 PFC2D 模擬分析時發現，當斷層傾角小於 37.5°時，上盤會產生逆衝斷層，若產生逆衝斷層則對於上盤的地表變形的影響範圍會加大。圖 5.2.4 為上覆土層

產生逆衝斷層(back-thrust fault)時，正規化地表變形剖面之示意圖，a_i 表示不同階段之上盤最大地表高程與未錯動前之下盤地表高程差；而 a_j 表示發生逆向斷層時，不同階段正規化之上盤最大地表高程與 h/H 之差值，通常 aj 值會在 h/H>6.25% 後才產生，意即 a_j 產生之時機會晚於 a_i。一般而言，當斷層傾角大於等於 37.5˚時，不會產生逆衝斷層，則此時之 a_j 值為 0。在斷層傾角大於或等於 37.5˚時，利用 Gompertz 方程式之 4 個參數 a、b、x_0 及 y_0，可以直接求得不同階段之地表影響範圍（x_1 及 x_2 值）。但是在斷層傾角小於 37.5 度時，會產生逆衝斷層，比對 PFC2D 數值模擬的成果，可以發現當 a_j 約略等於 a_i 時，則以 a_i 階段時對下盤所產生之影響距離 x_2 值之負數做為估計上盤之影響距離 x_{1m}(x_{1m}=-x_2)。以表 5.2.1 及表 5.2.2 中 r =10%為例，查表 5.2.2 當 r=10%或 h/H=0.1 時 a=0.16、x_1=0.7、x_2=1.49。當無逆衝斷層產生時，a≒r、但當產生逆衝斷層時則 a>r 此時兩者之差為 a_j 值即 a_j=0.06 (或者是 6%)。表 5.2.1 中當 r=6.25%(a_i=6.25%)時 x_2=1.37。因為 a_j≒a_i 所以上盤之影響值為 x_{1m}=-x_2，意即 x_{1m}=-1.37 所以產生逆衝斷層時之影響範圍為 x_{1m}=-1.37、x_2=1.49。

本研究以 PFC2D 程式來模擬逆斷層通過砂土層(砂土層的摩擦角分別為 30˚、33˚、36˚、40˚)以及黏土層覆蓋砂土層(其中黏土層 c=35kPa，砂土層的摩擦角為 33˚)的地表變形剖面。圖 5.2.5~5.2.9 分別展示逆斷層錯動時，上覆土層具有不同的剪力強度下，以及在不同的錯動比(r)下，引致覆土層地表變形的影響範圍。利用左右兩側地表變形剖面的斜率為 1/150 作為劃分準則(如圖 5.2.2 所示)的範圍，來定義為逆斷層錯動的影響範圍，以包絡線回歸方式來評估最大的影響範圍。圖 5.2.5 為砂土摩擦角為 30˚的條件下，x_{1m}、x_1 及 x_2 影響範圍包絡線，圖中藍色的點代表於不同斷層傾角下(22.5º、30º、37.5º、45º、52.5º、60º、67.5º、75º、82.5º、90º)及不同基盤垂直錯動對土層厚度(H)之正規化比值 h/H=1.25%~25%或 r=1.25%~25%下盤 x_2 之影響範圍，紅色的點則代表上盤 x_1 影響範圍(斷層傾角 37.5˚以下之 x_{1m} 修正範圍)。於不同斷層傾角及不同基盤垂直錯動對土層厚度(H)之正規化比值 r，可由包絡回歸之方式得 x_{1m}、x_1 及 x_2，其包絡回歸方程是分別為：

$$x_1 = -0.612 - 0.022r \quad \text{式 5.2.3}$$

$$x_2 = 1.282 + 0.037r \quad \text{式 5.2.4}$$

其中 r＞0

$$x_{1m} = -1.133 + 0.026r \quad \text{式 5.2.5}$$

其中 r＞6.25%

以同樣之模式可分別求得摩擦角為33˚、36˚、40˚之砂土層及黏土砂互層 x_{1m}、x_1 及 x_2 之回歸方程式(如表 3.3.5)。圖 5.2.10 為摩擦角為 33˚、36˚、40˚及黏土砂覆層(其中 C=35kPa，砂摩擦角為 33 度)下 x_{1m}、x_1 及 x_2 之影響範圍包絡線比較圖，圖 5.2.10 中紅色、藍色、綠色、黑色及粉紅色分別代表 33˚、36˚、40˚及黏土砂互層之回歸方程式。x_{1m} 影響距離由點線代表、x_1 影響距離由實線代表、x_2 影響距離由虛線代表。由圖 5.2.10 可看出摩擦角為 30˚時有最大之 x_{1m}、x_1 及 x_2 影響範圍，其原因為顆粒摩擦角小，則其自立性較差故會產生較大之影響範圍。

圖 5.2.11~圖 5.2.20 分別展示不同斷層傾角的逆斷層錯動時，上覆土層具有不同的剪力強度下，以及在不同的錯動比，引致上覆土層地表變形的影響範圍。利用左右兩側地表變形剖面的斜率為 1/150 的範圍，來定義逆斷層錯動的影響範圍，以包絡線回歸方式來評估影響範圍。圖 5.2.11 摩擦角為 30˚、33˚、36˚、40˚及黏土砂互層，斷層傾角 Dip=22.5˚下 x_{1m}、x_1 及 x_2 之影響範圍包絡線比較圖。紅色點表示摩擦角為 30˚之土層在不同基盤垂直錯動對土層厚度(H)之正規化比值 h/H(r=1.25%`25%)下正規化影響範圍，其於藍色、綠色、黑色及粉紅色分別代表摩擦角為 33˚、36˚、40˚及黏土砂覆層在不同基盤垂直錯動對土層厚度(H)之正規化比值 h/H (r=1.25%`25%)下正規化影響範圍。於斷層傾角為 22.5˚及不同基盤垂直錯動對土層厚度(H)之正規化比值 r，可由包絡回歸之方式得 x_{1m}、x_1 及 x_2 之影響範圍，所得之包絡回歸方程與(式 5.2.3~5)相同。

以同樣之做法分別可得斷層傾角為 30˚、37.5˚、45˚、52.5˚、60˚、67.5˚、75˚、82.5˚及 90˚下之 x_{1m}、x_1 及 x_2 之回歸方程式(如表 5.2.3)。圖 3.3.31 為不同之斷層傾角下 x_{1m}、x_1 及 x_2 之影響範圍包絡線比較圖，圖 5.2.21 中 x_{1m} 影響距離由點線代表、x_1 影響距離由實線代表、x_2 影響距離由虛線代表。由圖 5.2.21 可看

出斷層傾角介於 22.5°~75°間，較小的斷層傾角具有較大之 x_{1m}、x_1 及 x_2 影響範圍。於圖中亦可觀察出當基盤垂直錯動對土層厚度(H)之正規化比值 r 愈大時其 x_{1m}、x_1 及 x_2 影響範圍愈大。當斷層傾角等於 22.5°及 r=25%時具有最大之 x_{1m}、x_1 及 x_2 影響範圍。

圖 5.2.22 為摩擦角為 30°、33°、36°、40°及黏土砂互層之土壤，在不同之斷層傾角及不同基盤垂直錯動對土層厚度(H)之正規化比值 r 下 x_{1m}、x_1 及 x_2 之最大影響範圍包絡線。可由包絡回歸之方式得 x_{1m}、x_1 及 x_2 之最大影響範圍，其包絡回歸方程是分別為：

$$x_1 = -0.612 - 0.022r \qquad \text{式 5.2.6}$$

$$x_2 = 1.282 + 0.037r \qquad \text{式 5.2.7}$$

其中 r＞0

$$x_{1m} = -1.235 + 0.022r \qquad \text{式 5.2.8}$$

其中 r＞6.25%

圖 5.2.22 顯示(式 5.2.6~8)之包絡回歸方式所求得之 x_{1m}、x_1 及 x_2 範圍可代表最大之影響範圍。由表 5.2.3 至表 5.2.5 知，當摩擦角為 30°及斷層傾角為 22.5°時其範圍可做為砂性土壤 x_{1m}、x_1 及 x_2 之最大影響範圍。在不同之斷層傾角及不同基盤垂直錯動對土層厚度(H)之正規化比值 r 下之各項參數由表 5.2.3 至表 5.2.5 內知 r 與 $x_{outcropping}$ 數值作回歸則可得 $x_{outcropping}$ 之回歸方程式為：

$$x_{outcropping} = 1.102 + 0.031r \qquad \text{式 5.2.9}$$

由(式 5.2.6~9)所繪成之砂性土壤最大影響範圍圖如圖 5.2.23 及表 5.2.5 所示，虛線左側表示斷層傾角小於等於 37.5°之上盤最大影響範圍 x_{1m}，實線兩側為斷層傾角大於 37.5°上盤及下盤影響範圍 x_1、x_2，影響範圍內之黑點表示斷層地表出露點 $x_{outcropping}$ 之距離，由圖可看出當逆斷層錯動時上盤所受的影響範圍會大於下盤。

表 5.2.1 斷層傾角等於 22.5°時未修正之 x_1 及 x_2 之回歸方程式

r (%)	a	b	x_0	y_0	θ_{max}	Degree	$x_{outcropping}$	x_1	x_2
1.25	0.01	-0.18	0.83	0.00	-0.02	-1.21	1.00	0.47	1.04
2.5	0.03	-0.16	1.13	0.00	-0.06	-3.54	1.29	0.63	1.37
3.75	0.05	-0.09	1.22	0.00	-0.20	-11.34	1.31	0.85	1.38
5	0.07	-0.08	1.23	0.00	-0.31	-17.38	1.31	0.85	1.38
6.25	0.09	-0.07	1.23	0.00	-0.47	-25.13	1.30	0.85	1.37
7.5	0.11	-0.09	1.24	0.00	-0.48	-25.80	1.32	0.79	1.41
8.75	0.13	-0.08	1.25	0.00	-0.58	-30.15	1.34	0.79	1.42
10	0.16	-0.10	1.28	0.00	-0.56	-29.18	1.38	0.70	1.49
11.25	0.18	-0.13	1.30	0.00	-0.52	-27.26	1.43	0.61	1.56
12.5	0.20	-0.15	1.33	0.00	-0.50	-26.46	1.48	0.54	1.63
13.75	0.22	-0.16	1.36	0.00	-0.51	-27.24	1.51	0.51	1.68
15	0.25	-0.18	1.37	0.00	-0.51	-27.07	1.54	0.43	1.72
16.25	0.27	-0.20	1.39	0.00	-0.50	-26.43	1.59	0.33	1.79
17.5	0.29	-0.21	1.42	0.00	-0.51	-27.22	1.62	0.32	1.83
18.75	0.31	-0.22	1.45	0.00	-0.52	-27.47	1.67	0.27	1.89
20	0.33	-0.24	1.48	0.00	-0.51	-27.13	1.72	0.20	1.96
21.25	0.35	-0.26	1.51	0.00	-0.50	-26.45	1.77	0.12	2.03
22.5	0.38	-0.29	1.53	0.00	-0.48	-25.66	1.82	0.01	2.10
23.75	0.40	-0.28	1.56	0.00	-0.51	-27.07	1.85	0.04	2.13
25	0.41	-0.30	1.61	0.00	-0.50	-26.59	1.91	0.00	2.21

表 5.2.2 摩擦角為 30°、斷層傾角等於 22.5°時之回歸方程式參數

r (%)	a	b	x_0	y_0	θ_{max}	Degree	$x_{outcropping}$
1.25	0.01	-0.18	0.83	0.00	-0.02	-1.21	1.00
2.5	0.03	-0.16	1.13	0.00	-0.06	-3.54	1.29
3.75	0.05	-0.09	1.22	0.00	-0.20	-11.34	1.31
5	0.07	-0.08	1.23	0.00	-0.31	-17.38	1.31
6.25	0.09	-0.07	1.23	0.00	-0.47	-25.13	1.30
7.5	0.11	-0.09	1.24	0.00	-0.48	-25.80	1.32
8.75	0.13	-0.08	1.25	0.00	-0.58	-30.15	1.34
10	0.16	-0.10	1.28	0.00	-0.56	-29.18	1.38
11.25	0.18	-0.13	1.30	0.00	-0.52	-27.26	1.43
12.5	0.20	-0.15	1.33	0.00	-0.50	-26.46	1.48
13.75	0.22	-0.16	1.36	0.00	-0.51	-27.24	1.51
15	0.25	-0.18	1.37	0.00	-0.51	-27.07	1.54
16.25	0.27	-0.20	1.39	0.00	-0.50	-26.43	1.59
17.5	0.29	-0.21	1.42	0.00	-0.51	-27.22	1.62
18.75	0.31	-0.22	1.45	0.00	-0.52	-27.47	1.67
20	0.33	-0.24	1.48	0.00	-0.51	-27.13	1.72
21.25	0.35	-0.26	1.51	0.00	-0.50	-26.45	1.77
22.5	0.38	-0.29	1.53	0.00	-0.48	-25.66	1.82
23.75	0.40	-0.28	1.56	0.00	-0.51	-27.07	1.85
25	0.41	-0.30	1.61	0.00	-0.50	-26.59	1.91

表 5.2.3 逆斷層錯動後於不同之 r 下，地表可能產生之最大影響範圍

Dip	x_{1m}	x_1	x_2	pping
1.25		-0.64	1.33	1.00
2.50		-0.67	1.37	1.29
3.75		-0.69	1.42	1.31
5.00		-0.72	1.47	1.31
6.25	-1.30	-0.75	1.51	1.30
7.50	-1.33	-0.78	1.56	1.32
8.75	-1.36	-0.80	1.61	1.34
10.00	-1.39	-0.83	1.65	1.38
11.25	-1.43	-0.86	1.70	1.43
12.50	-1.46	-0.89	1.74	1.48
13.75	-1.49	-0.91	1.79	1.51
15.00	-1.52	-0.94	1.84	1.54
16.25	-1.56	-0.97	1.88	1.59
17.50	-1.59	-1.00	1.93	1.62
18.75	-1.62	-1.02	1.98	1.67
20.00	-1.65	-1.05	2.02	1.72
21.25	-1.69	-1.08	2.07	1.77
22.50	-1.72	-1.11	2.11	1.82
23.75	-1.75	-1.13	2.16	1.85
25.00	-1.78	-1.16	2.21	1.91

表 5.2.4 摩擦角 30°、33°、36°、40°及黏土砂互層 x_{1m}、x_1 及 x_2 之回歸方程式

土壤型式	x_{1m}	x_1	x_2
砂摩擦角為 30°	-1.133-0.026r	-0.612-0.022r	1.282+0.037r
砂摩擦角為 33°	-1.083-0.031r	-0.385-0.032r	1.186+0.036r
砂摩擦角為 36°	-0.996-0.022r	-0.385-0.036r	1.225+0.027r
砂摩擦角為 40°	-1.172-0.018r	-0.249-0.030r	1.287+0.031r
黏土/砂互層	-1.363-0.04r	-0.635-0.013r	1.263+0.031r

註: x_{1m} 適用於 r>=6.25% 及斷層傾角在 37.5°以下

表 5.2.5 摩擦角為 30°、33°、36°、40°及黏土砂互層，斷層傾角 Dip=22.5°~90°下 x_{1m}、x_1 及 x_2 之回歸方程式

斷層傾角 Dip	x_{1m}	x_1	x_2
22.5°	-1.133-0.026r	-0.612-0.022r	1.282+0.037r
30°	-0868-0.023r	-0.438-0.024r	1.287+0.031r
37.5°		-0.406-0.018r	1.303+0.023r
45°		-0.41-0.011r	1.200+0.021r
52.5°		-0.396-0.06r	1.027+0.018r
60°		-0.466+0.009r	1.005+0.014r
67.5°		-0.401+0.016r	0.977+0.005r
75°		-0.313+0.025r	0.649+0.013r
82.5°		0.230-0.0003r	0.726+0.012r
90°		0.389-0.022r	0.896+0.003r

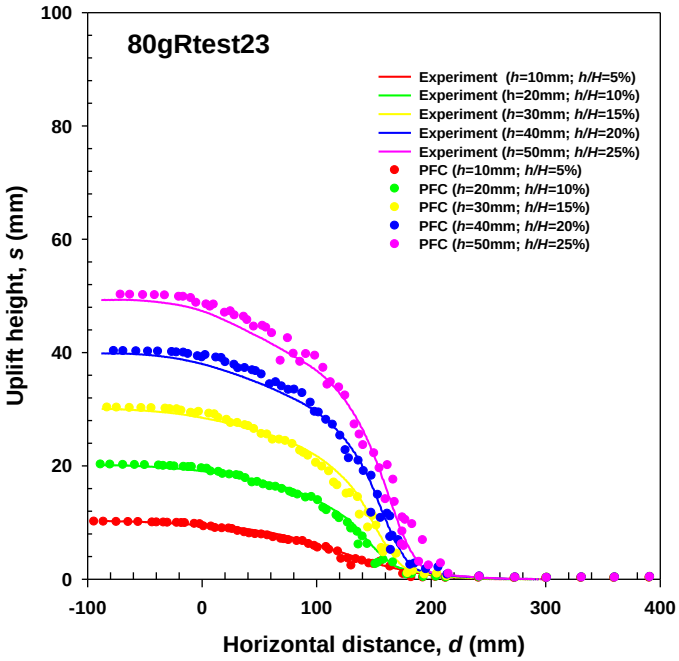


圖 5.2.1 離心機模型試驗與 PFC2D 模擬地表變形比較圖

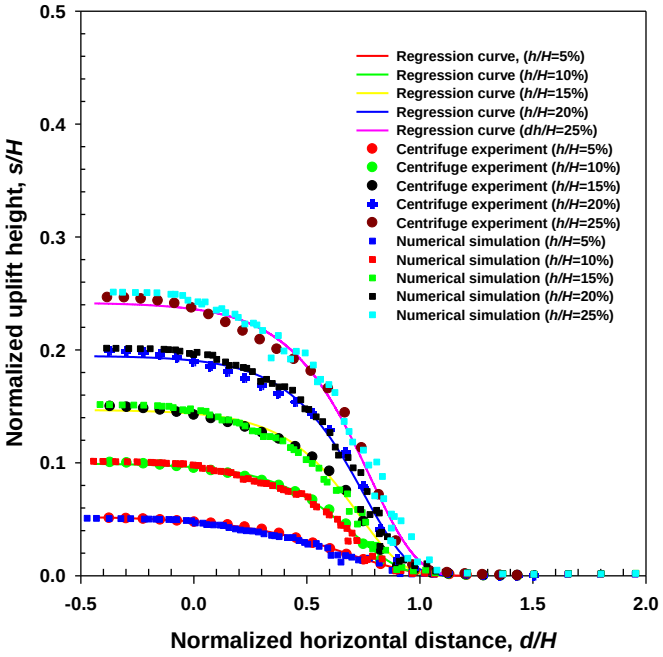


圖 5.2.2 Gompertz 曲線方程式與離心機模型試驗及 PFC2D 模擬地表變形正規化比較圖(斷層傾角為 60°)

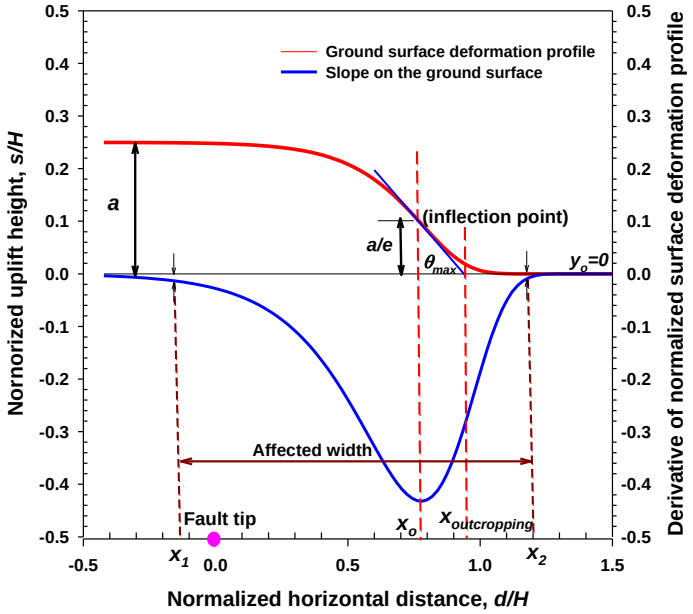


圖 5.2.3 以 Gompertz 方程式表示地表變形及地表斜率示意圖

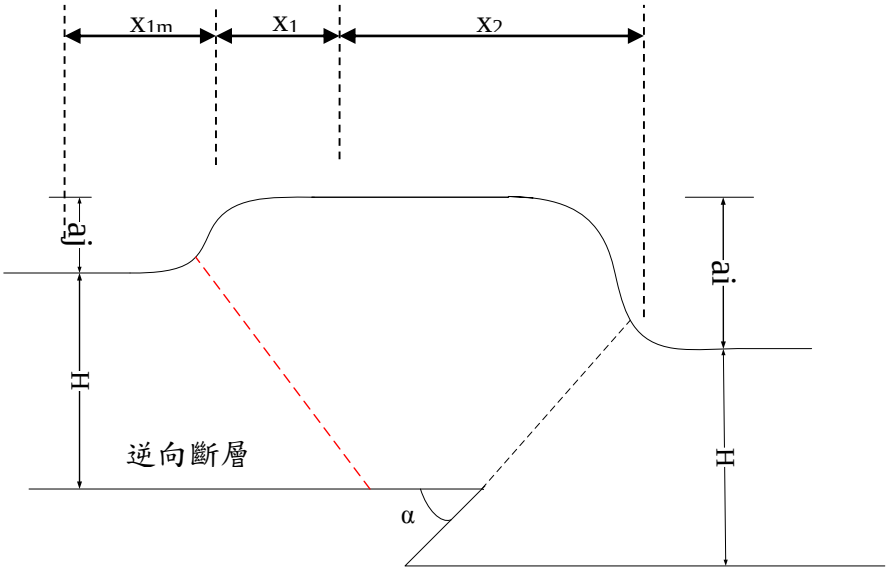


圖 5.2.4 土層產生逆向斷層變形之正規化示意圖

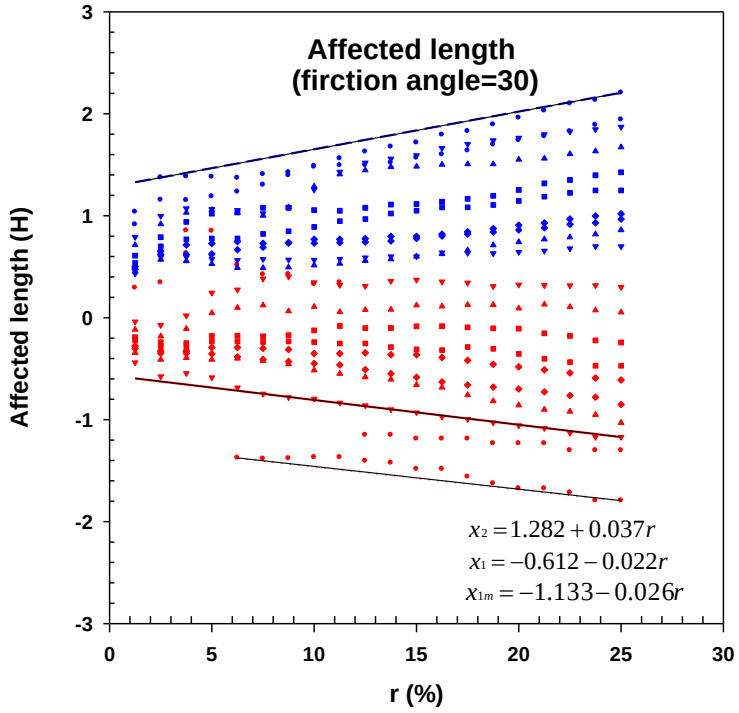


圖 5.2.5 直剪摩擦角為 30°下 x_{1m}、x_1 及 x_2 影響範圍包絡線

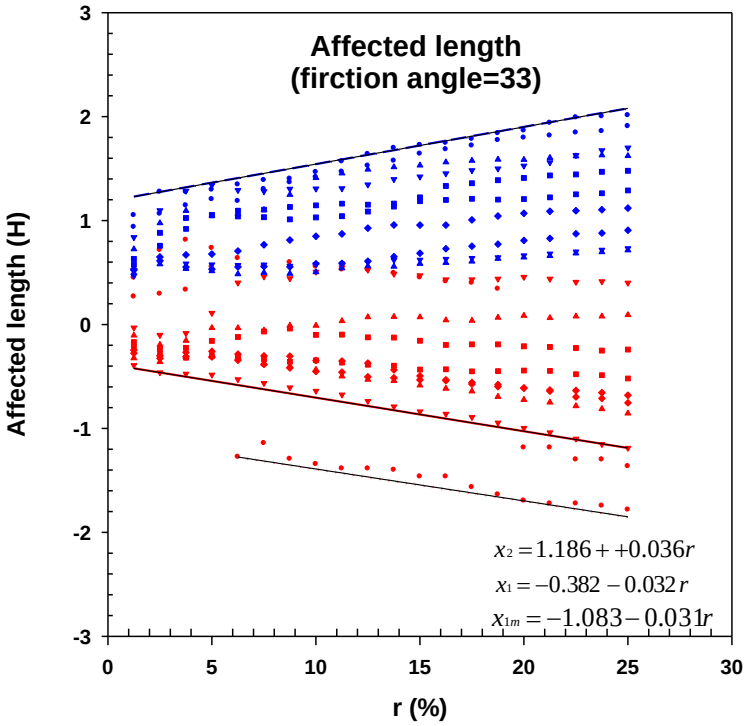


圖 5.2.6 直剪摩擦角為 33°下 x_{1m}、x_1 及 x_2 影響範圍包絡線

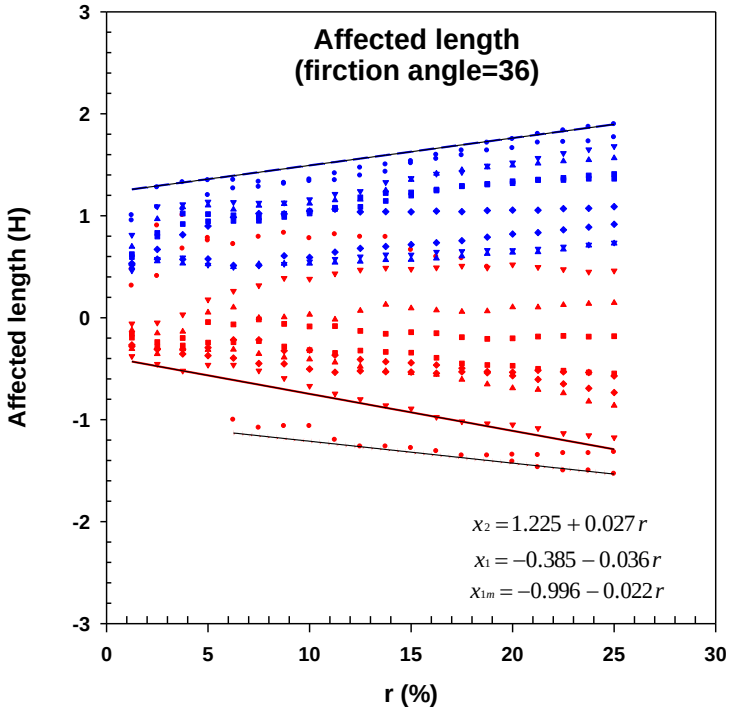


圖 5.2.7 直剪摩擦角為 36°下 x_{1m}、x_1 及 x_2 影響範圍包絡線

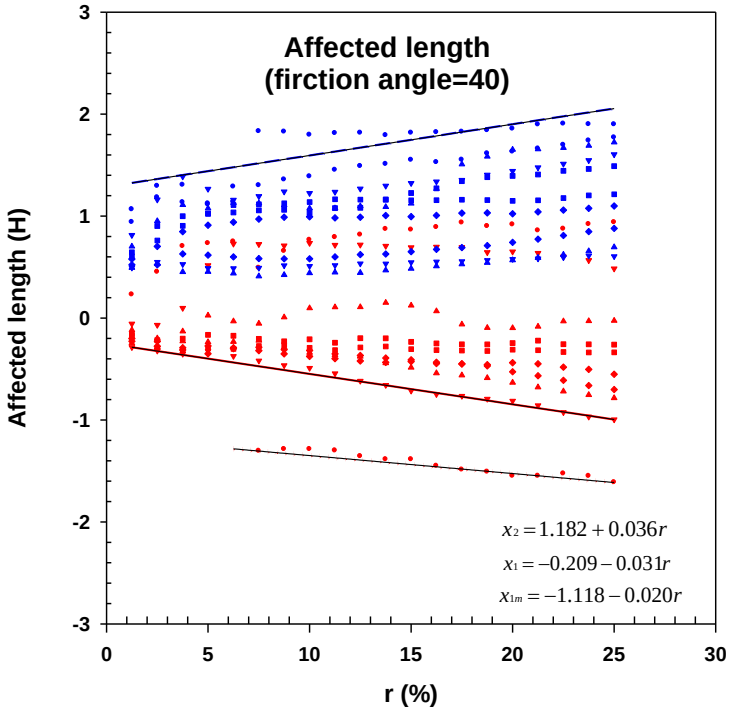


圖 5.2.8 直剪摩擦角為 40°下 x_{1m}、x_1 及 x_2 影響範圍包絡線

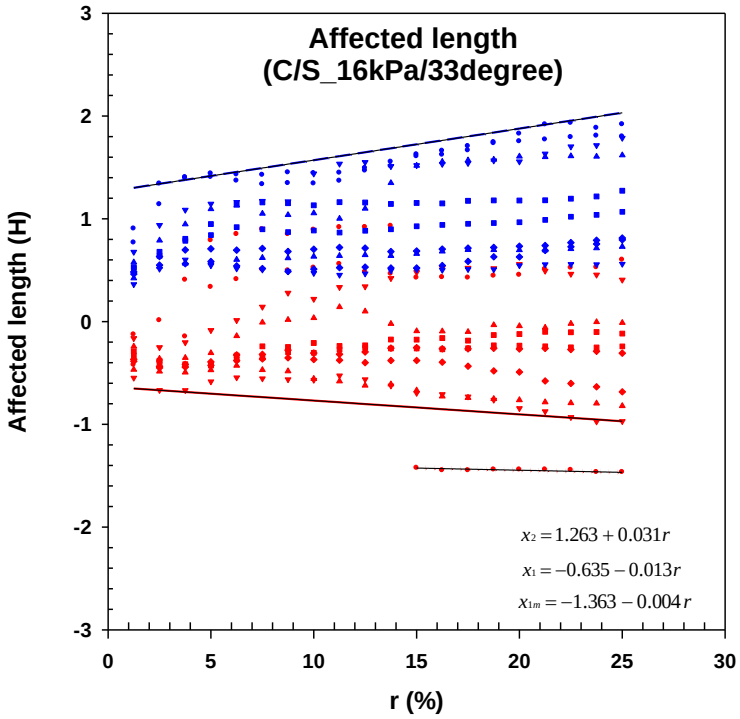


圖 5.2.9 黏土砂覆層(其中 C=35kPa，砂摩擦角為 33 度)下 x_{1m}、x_1 及 x_2 影響範圍包絡線

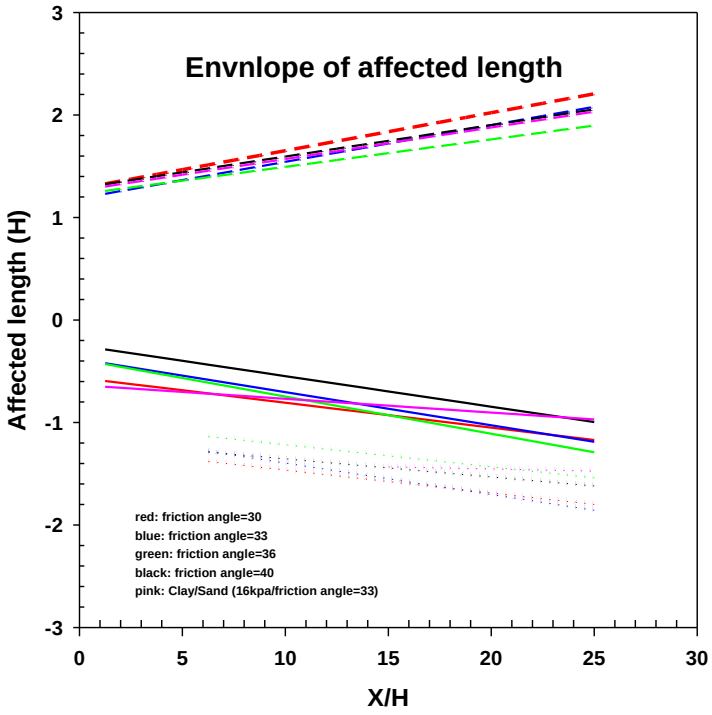


圖 5.2.10 摩擦角為 30°、33°、36°、40°黏土砂互層(其中 C=35kPa，砂摩擦角為 33 度)下 x_{1m}、x_1 及 x_2 之影響範圍比較

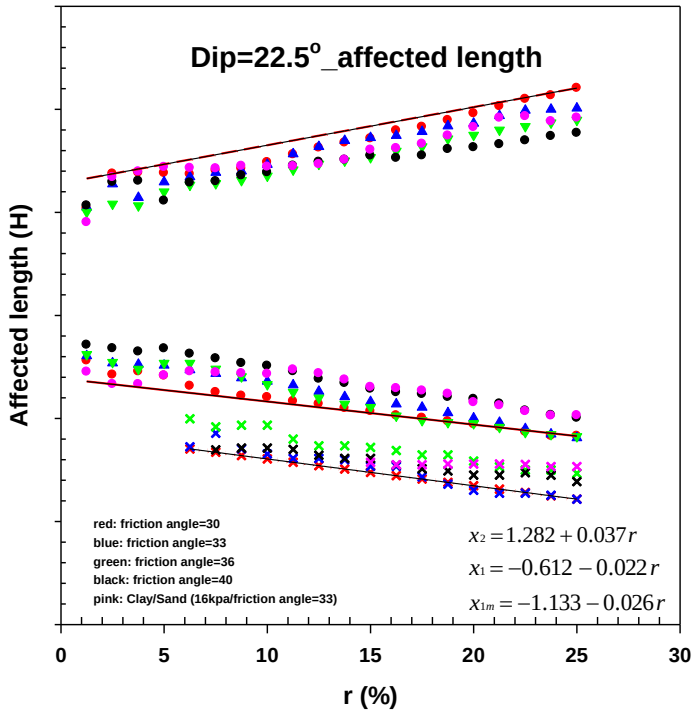


圖 5.2.11 摩擦角為 30°、33°、36°、40°黏土砂互層，斷層傾角 Dip=22.5°下 x_{1m}、x_1 及 x_2 之影響範圍比較

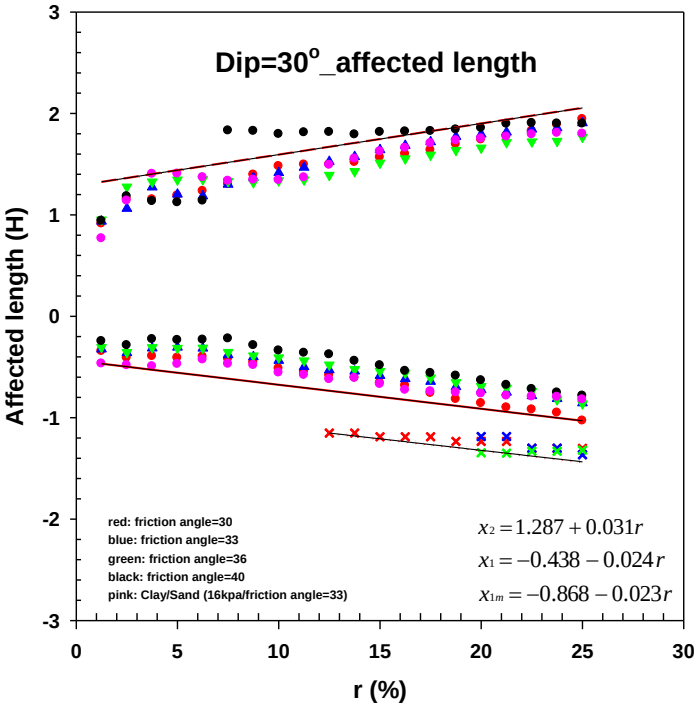


圖 5.2.12 摩擦角為 30°、33°、36°、40°黏土砂互層，斷層傾角 Dip=30°下 x_{1m}、x_1 及 x_2 之影響範圍比較

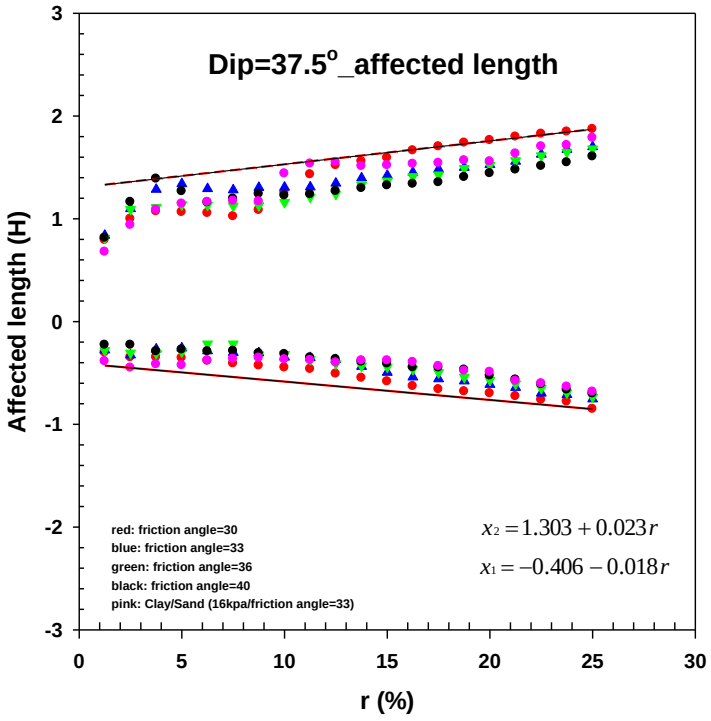


圖 5.2.13 摩擦角為 30°、33°、36°、40°黏土砂互層，斷層傾角 Dip=37.5°下 x_1 及 x_2 之影響範圍比較

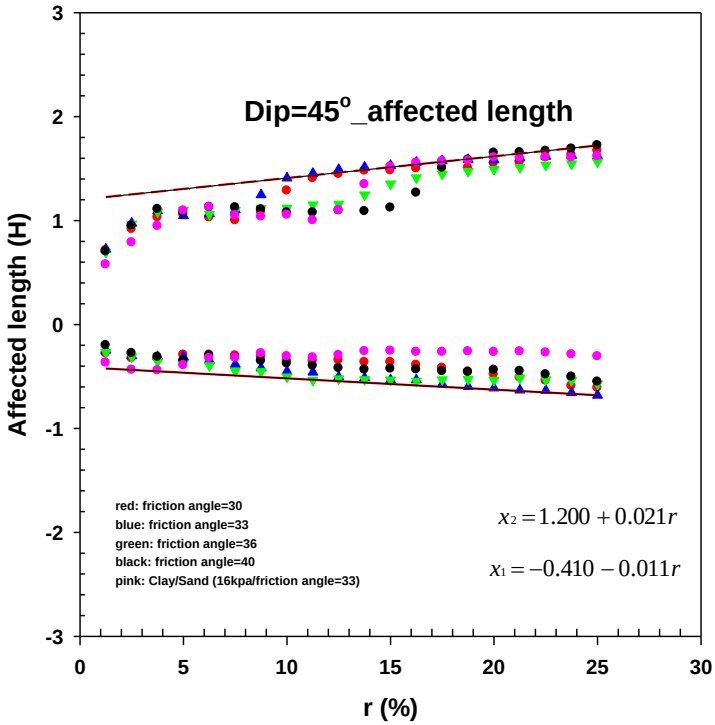


圖 5.2.14 摩擦角為 30°、33°、36°、40°黏土砂互層，斷層傾角 Dip=45°下 x_1 及 x_2 之影響範圍比較

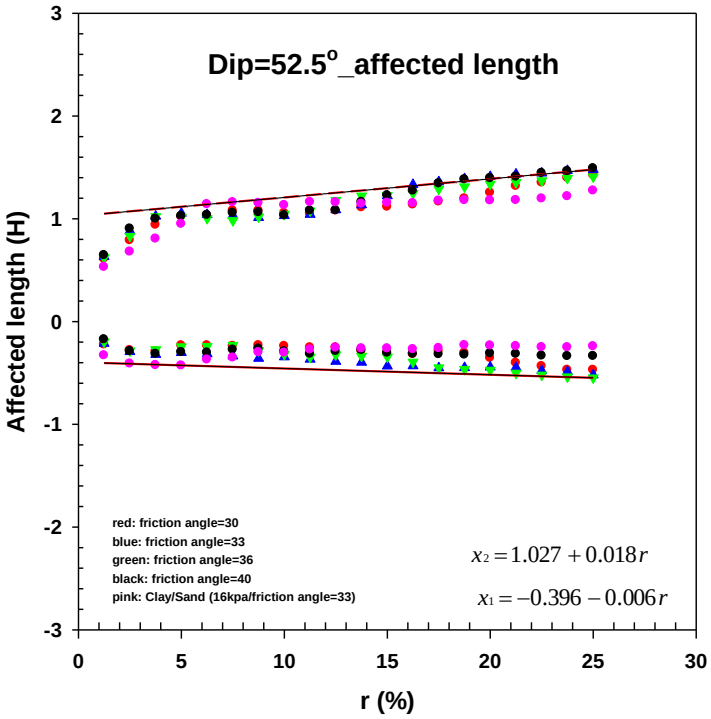


圖 5.2.15　摩擦角為 30°、33°、36°、40°黏土砂互層，斷層傾角 Dip=52.5°下 x_1 及 x_2 之影響範圍比較

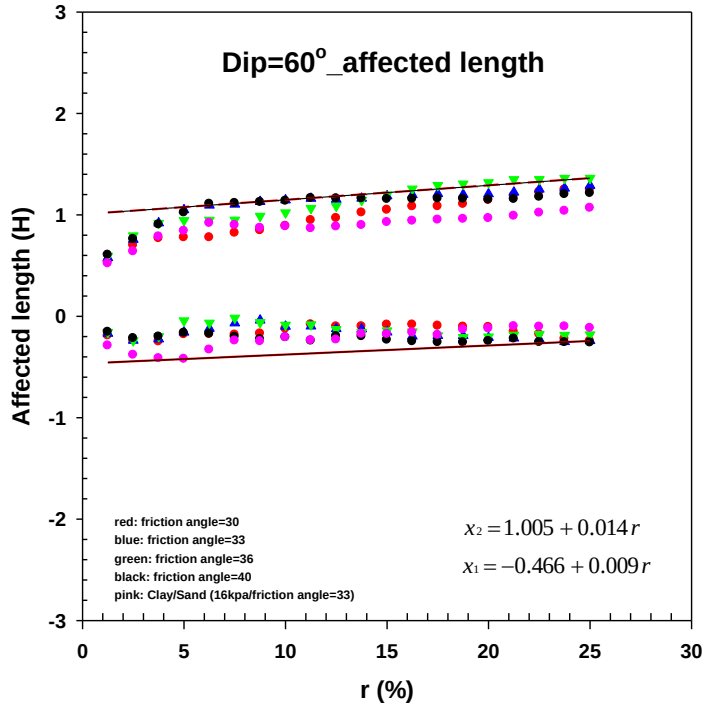


圖 5.2.16　摩擦角為 30°、33°、36°、40°黏土砂互層，斷層傾角 Dip=60°下 x_1 及 x_2 之影響範圍比較

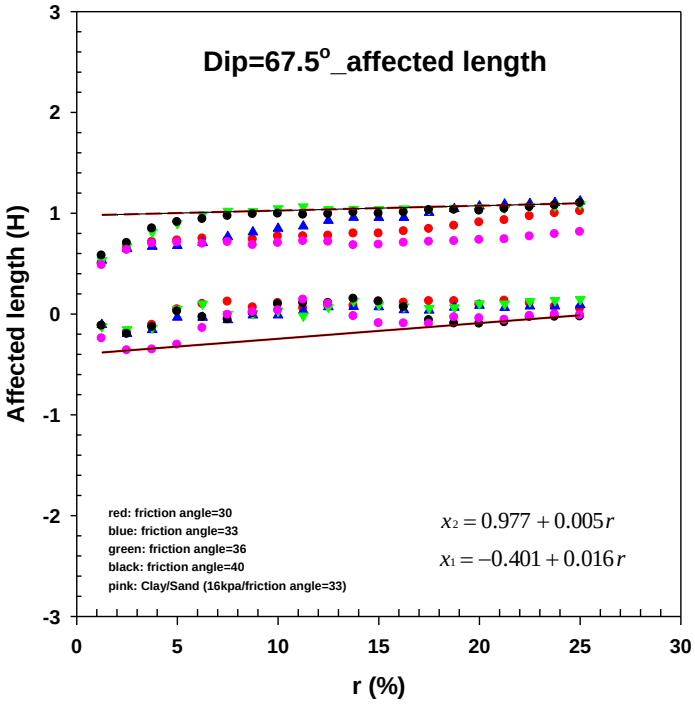


圖 5.2.17　摩擦角為 30°、33°、36°、40°黏土砂互層，斷層傾角 Dip=67.5°下 x_1 及 x_2 之影響範圍比較

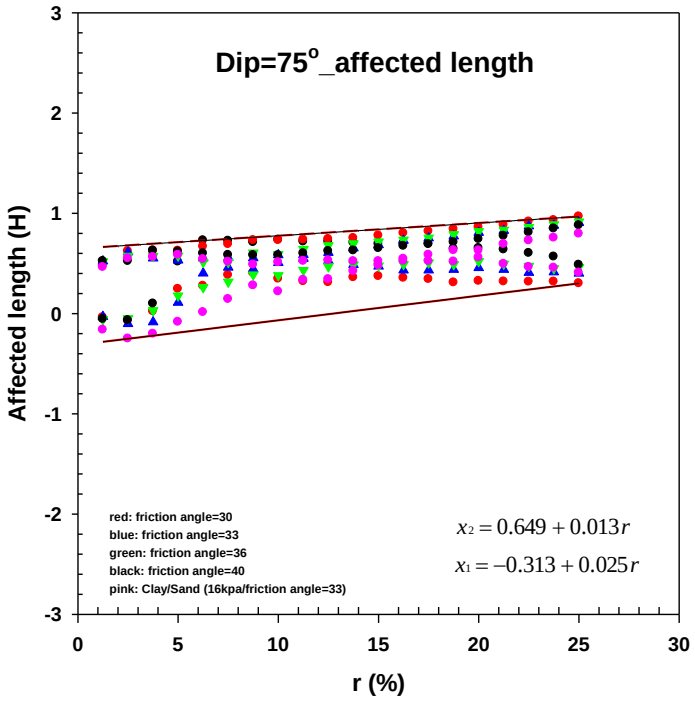


圖 5.2.18　摩擦角為 30°、33°、36°、40°黏土砂互層，斷層傾角 Dip=75°下 x

x_1 及 x_2 之影響範圍比較

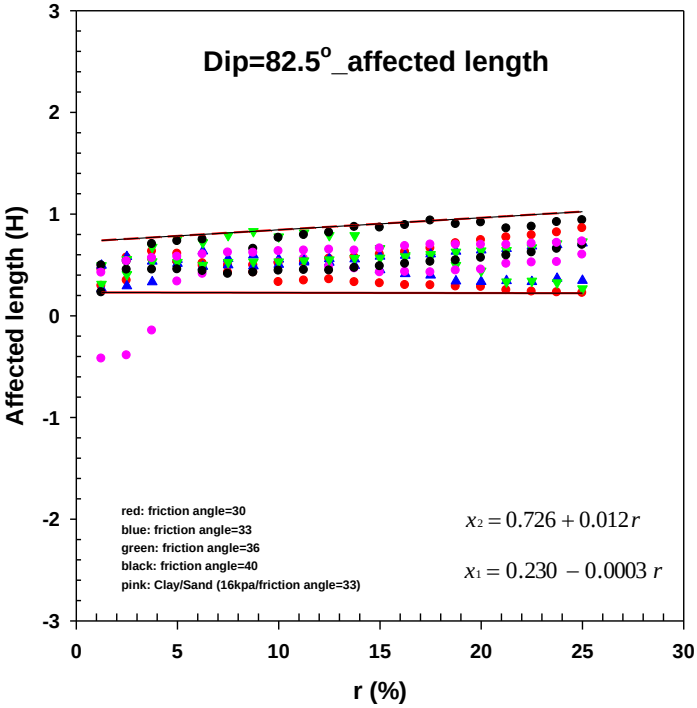


圖 5.2.19　摩擦角為 30°、33°、36°、40°黏土砂互層，斷層傾角 Dip=82.5°下 x_1 及 x_2 之影響範圍比較

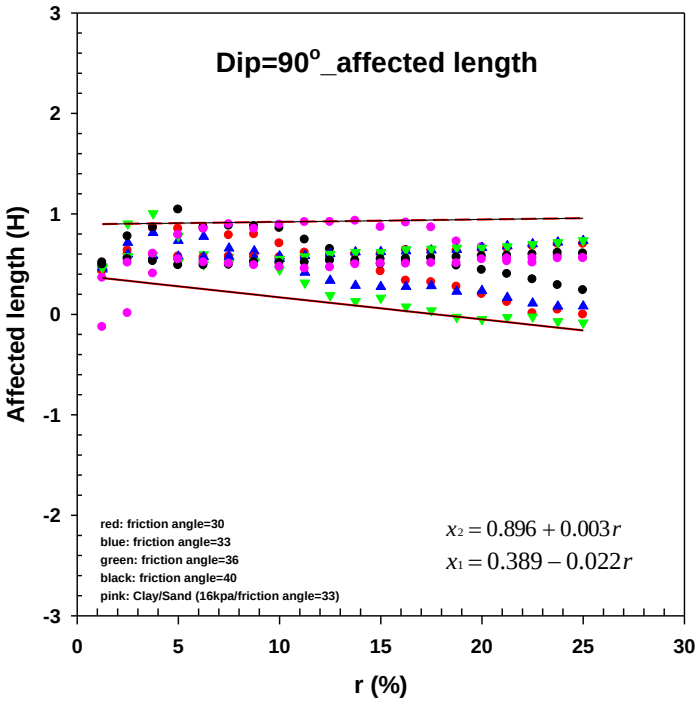


圖 5.2.20　摩擦角為 30°、33°、36°、40°黏土砂互層，斷層傾角 Dip=90°下 x_1 及 x_2 之影響範圍比較

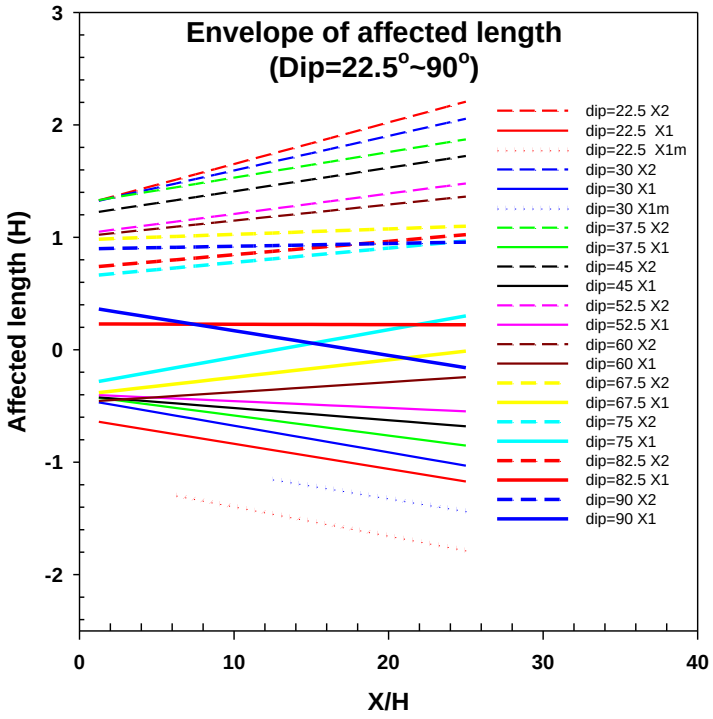


圖 5.2.21 摩擦角為 30°、33°、36°、40°黏土砂互層，斷層傾角 Dip=22.5°~90° 下 x_1 及 x_2 之影響範圍比較

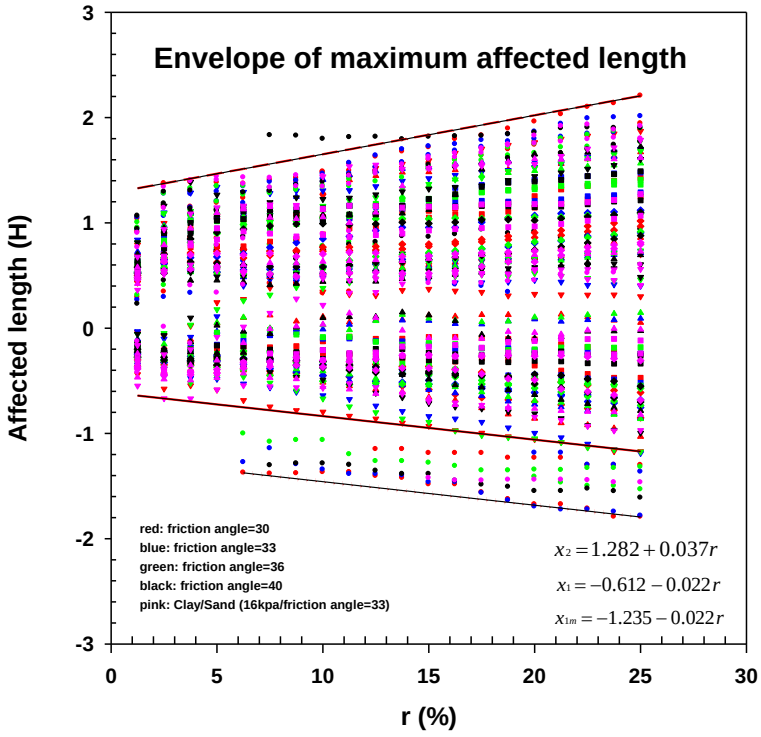


圖 5.2.22 摩擦角為 30°、33°、36°、40°黏土砂互層，斷層傾角 Dip=22.5°~90° 下之最大影響範圍包絡線

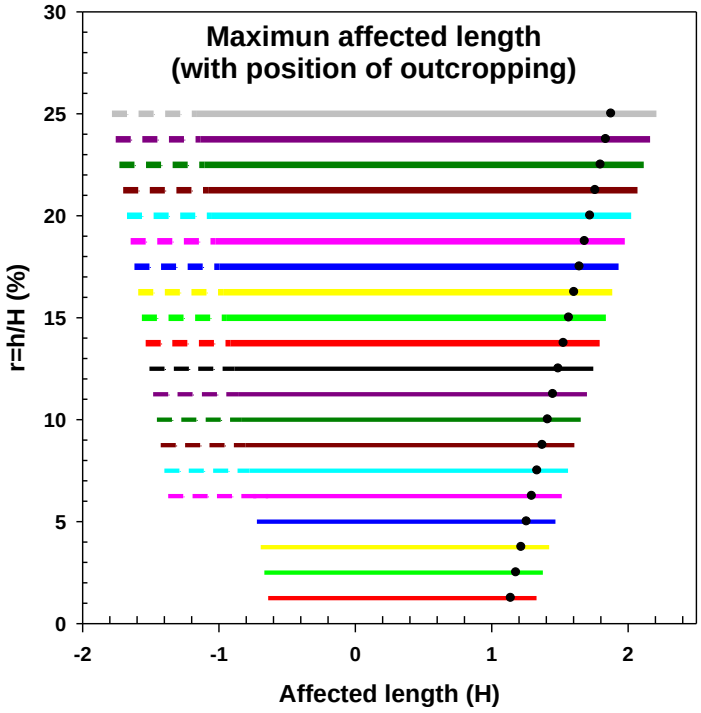


圖 5.2.23 不同錯動比，逆斷層錯動地表變形的最大影響範圍

5.3 正斷層錯動後引致之地表變形之影響範圍

由於正斷層的數值模擬容易出現地塹的構造，不易用一個函數來模擬地表剖面，所以在正斷層的部份，本研究直接使用地表顆粒之座標，計算地表任兩個顆粒之間的斜率，如果超過 1/150 即算為受影響之區域，待標示出所有受影響之區域後，則最左邊(x_1)及最右邊(x_2)之間距離定義為斷層錯動後地表變形的影響範圍(如圖 5.3.1)。然而，此法在非連續體力學中會出現歧異點，因此為消除歧異點，除了顆粒間斜率超過 1/150 之外，本研究還加上了另兩個條件：顆粒本身之旋轉角度超過 $\tan^{-1}(1/150)$、顆粒本身之位移超過模擬所使用之最大粒徑(2.98×10^{-3}m)，必需同時滿足以上三個條件才會視為受影響之區域。

以此方法套用在本研究針對不同參數之正斷層數值模擬之結果分析，圖 5.3.2 為摩擦角為 33°、35°、36°、40°、41°、47°、52°、60°之砂互正斷層，在不同之斷層傾角及不同基盤垂直錯動對土層厚度(H)之正規化比值 r 下，所有對應的斷層影響範圍邊界 x1 及 x2，左右 2 條參考線是考量最大之安全係數，即最大影響範圍包絡線，其包絡回歸方程是分別為：

當 0<r<3%時

$$x_1 = -0.02 - 0.025r \qquad \text{式 5.3.1}$$

$$x_2 = 0.01 + 0.08r \qquad \text{式 5.3.2}$$

當 r＞3%時

$$x_1 = -0.232 - 0.039r \qquad \text{式 5.3.3}$$

$$x_2 = 0.198 + 0.029r \qquad \text{式 5.3.4}$$

由(式 5.3.1)~(式 5.3.4)所繪成之砂性土壤最大影響範圍圖如圖 5.3.3 所示。

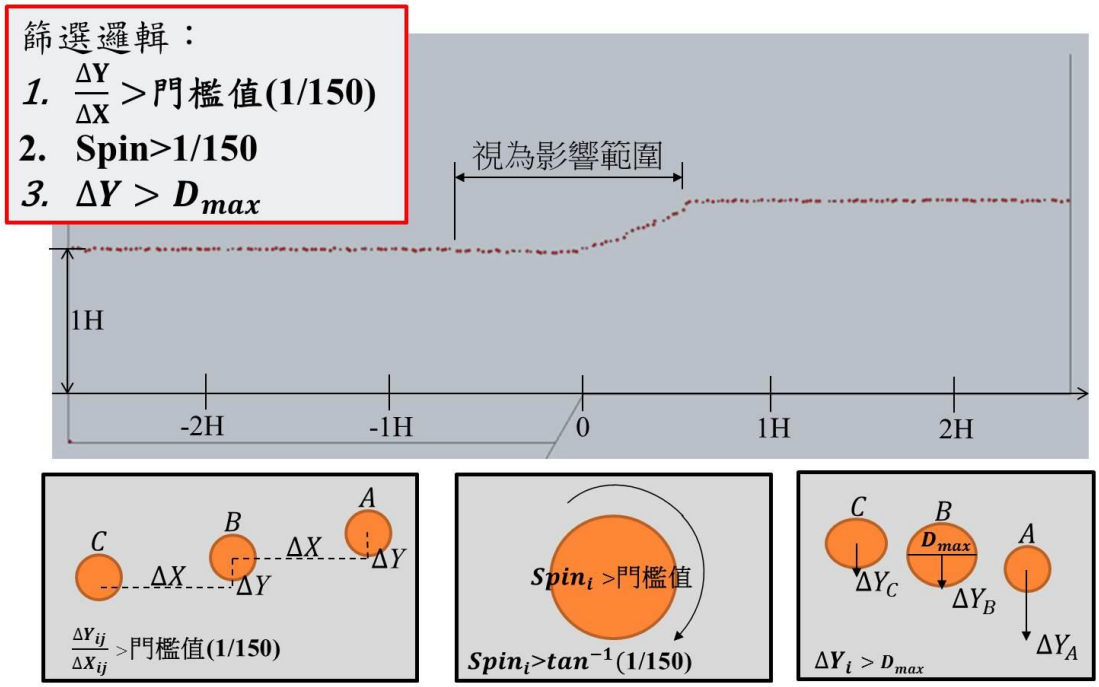


圖 5.3.1 正斷層求取地表影響範圍之門檻示意圖

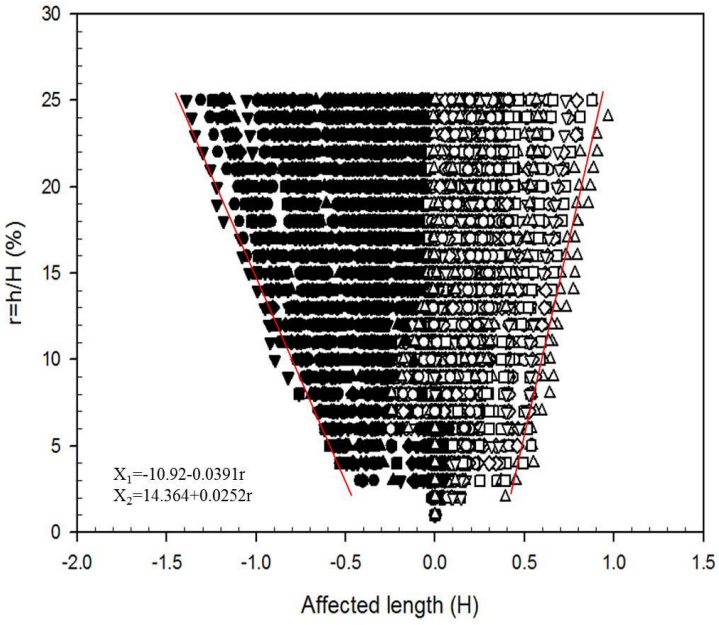


圖 5.3.2 正斷層求取地表影響範圍之門檻示意圖

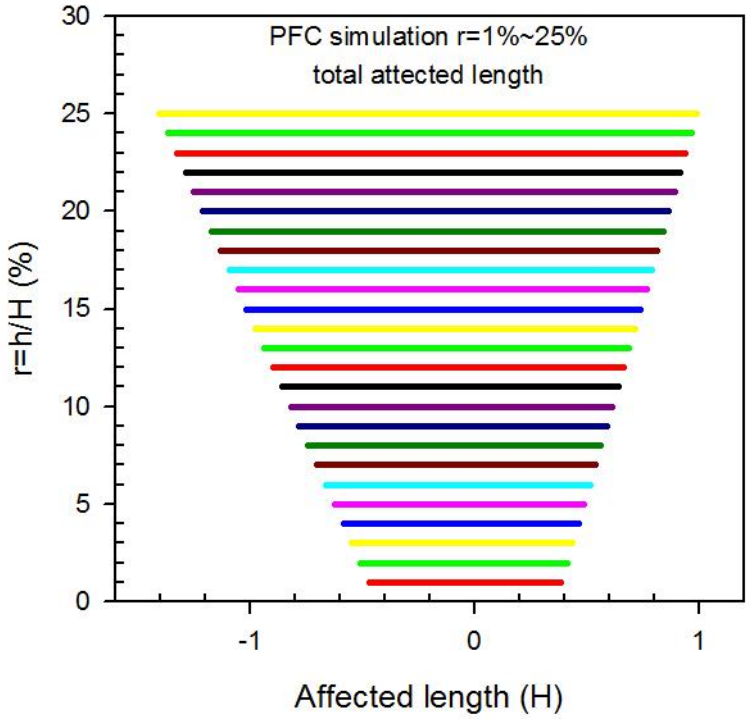


圖 5.3.3 正斷層求取地表影響範圍之門檻示意圖

5.4 橫移斷層錯動後引致之地表變形之影響範圍

橫移斷層地表變形影響範圍討論，因實驗模型規劃，不易觀察影響範圍，故參考相關文獻綜合討論，國外相似砂盒模型之紀錄，彙整如表 5.4.1，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 5.4.1 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 5.4.2 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。

表 5.4.1 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

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

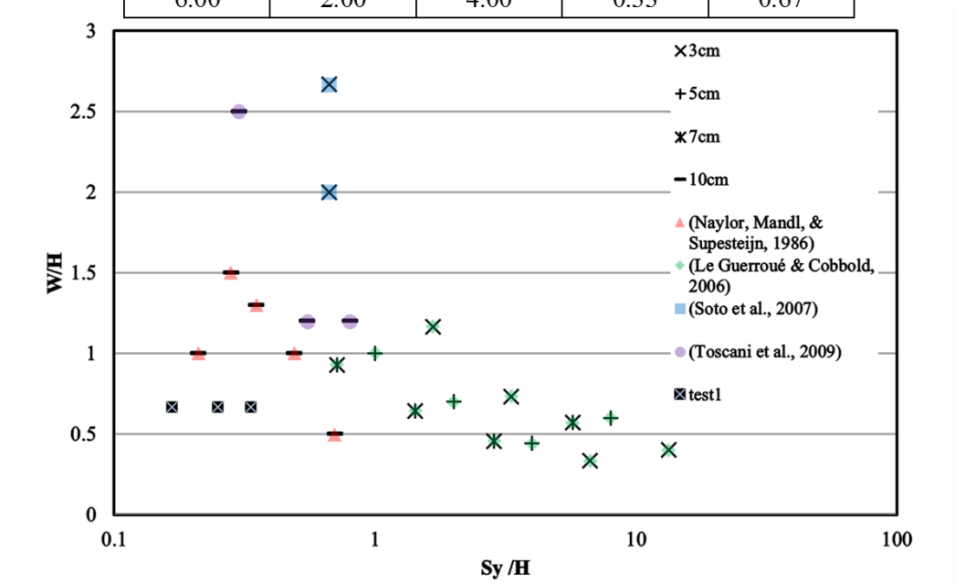


圖 5.4.1 橫移砂箱試驗之地表破裂跡發展影響範圍

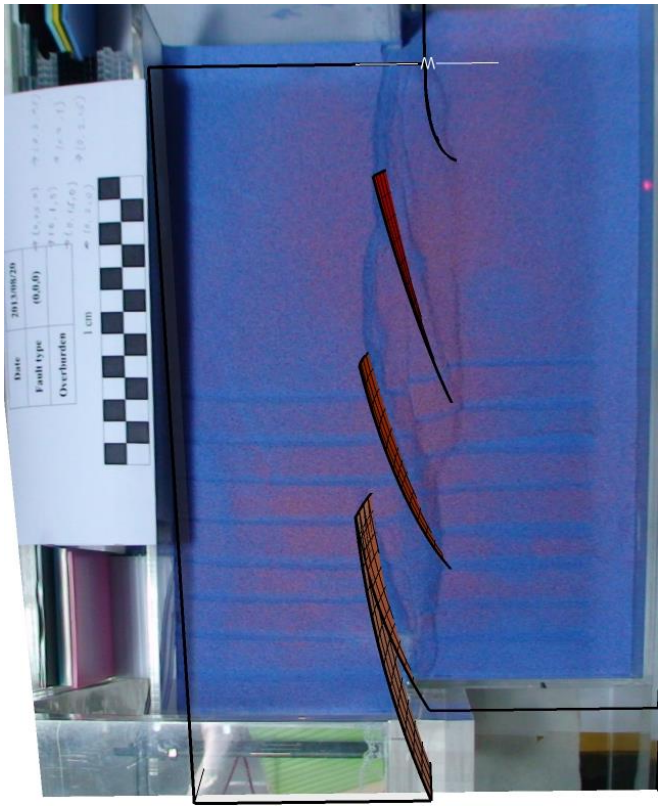


圖 5.4.2 砂箱試驗第七階段地表破裂跡與影像疊合圖

第六章、斷層與結構物互制討論

6.1 斷層與結構物互制文獻回顧

台灣常見之建物基礎型式為淺基礎(shallow foundation)、樁基礎(pile foundation)、沉箱基礎(caisson)以及隧道(tunnel)或維生管線(utility pipeline)等，有為數不少建物之基礎靠近可能之斷層帶，一旦斷層發生錯動，若基礎本身建築於上盤或下盤，或甚至是橫跨斷層線，都可能會使得基礎，乃至於建築物發生損壞，造成生命財產的損失。基礎座落於地下，其相對於斷層線的距離、斷層本身錯動量及位移特性以及土壤性質等，均會影響到兩者之間互制之關係，因此相關文獻中對於不同基礎型式在受到斷層錯動時之受力與變形特形進行實驗、數值分析以及現地調查，以了解其受力變形特性。以下針對鄰近斷層線之條形基礎、深基礎、隧道以及沉箱基礎，在斷層錯動時，其與斷層之關係進行整理及說明。

6.1.1 淺基礎

淺基礎(Shallow Foundation)之型式可依其形狀或尺寸分為條形基礎(Strip Foundation)、方型基礎(Square Foundation)、圓形基礎(Circular Foundation)以及筏式基礎(Mat Foundation)等。Anastasopoulos 等人(2009)針對條形基礎受到正斷層錯動下之影響進行探討，研究使用固定寬度之條形基礎位於地表面，並無任何埋置深度，且座落於乾砂層中，其相對密度為 60%，屬中等緊密砂土層，研究中主要針對條形基礎所在位置(s/B)、基礎載重以及條形基礎 EI 值之不同進行分析，相關參數如圖 6.1.1 所示。

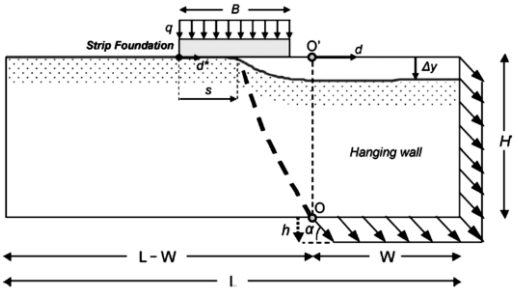


圖 6.1.1 條形基礎與正斷層相對位置圖(Anastasopoulos 等人, 2009)

由研究結果可以得知，基礎位置會影響到基礎本身與土層之間接觸力分佈狀況，圖 6.1.2 上排圖形顯示基礎位置位於上盤(a)，橫跨(b)以及下盤(c)在正斷層錯動 2 公尺下，其剪應變帶之發展狀況，由該圖可以看出，當條形基礎橫跨正斷層時，其發展剪應變帶之範圍較另外兩種位置更廣，若基礎單純位於上盤或下盤，則剪應變帶會在基礎之邊緣出露地表。圖 6.1.2 中間排圖形顯示出基礎與土壤接觸應力在不同位置下之發展情形，若接觸應力為零，代表基礎與土壤無直接接觸，由圖 6.1.2 (a)可以看出，當基礎位於上盤時，隨著斷層錯動量增加 0、0.3、0.7、2.0、2.5 公尺後，其接觸應力逐漸由均勻分佈轉變為基礎版中間懸空(與土壤無接觸)，此一狀況會使得基礎版受力近似簡支樑受力情形，且由圖 2.1.2(a)下排圖形之彎矩分佈亦可以得知，隨著錯動量增加，基礎版所受正彎矩亦會同步增加，最大約為原來所受彎矩之 6 倍，造成基礎版受力狀態之不均，而可能損壞；若基礎版橫跨斷層線，則由圖 2.1.2(b)可以得知，其接觸力之發展與基礎位於上盤之情形完全不同，隨著斷層錯動量增加，反而是基礎兩端之接觸應力逐漸下降，甚至為零，代表在此一位置，基礎兩側可能會在斷層有較大錯動時懸空，使得其受力非常不均勻，就分析結果而言，基礎版左端點受力近似懸臂樑，而基礎版右側受力似近簡支樑，其所受變矩亦同步增加，最大會變為原來基礎版所受彎矩之 5 倍，亦可能使得基礎版產生損壞；若基礎位於斷層線下盤(圖 2.1.2 c)，則隨著斷層錯動量增加，其受力情形較近似橫跨斷層線之狀況，為兩側懸空之狀況，使得基礎版兩側類似懸臂樑之受力情形，在此一位置，最大彎矩約為原來所受彎矩之 4 倍。

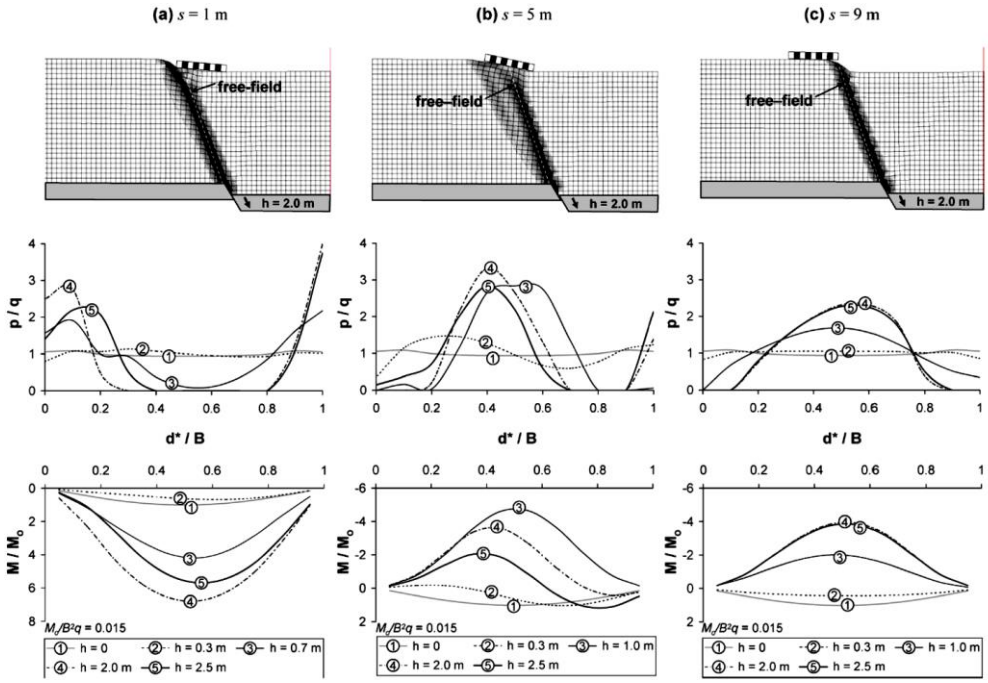


圖 6.1.2 條形基礎所在位置與接觸力、彎矩發展之關係(Anastasopoulos 等人, 2009)

此外，由於基礎大多不能承受過大之差異沉陷，若其角變量過大，則可能會使得結構物本身產生損壞，基礎構造設計規範針對此部分有詳細之介紹，一般可接受範圍在 1/500 到 1/300 之間。本研究亦針對基礎旋轉角進行探討，可以得知當基礎位於下盤時，正斷層之錯動會使基礎產生最小的旋轉角，且在錯動量之增加下，其基礎旋轉角維持一定值，當基礎版橫跨斷層線時，其旋轉角最大，基礎位於上盤時，其旋轉角為中間值，如圖 6.1.3 所示。

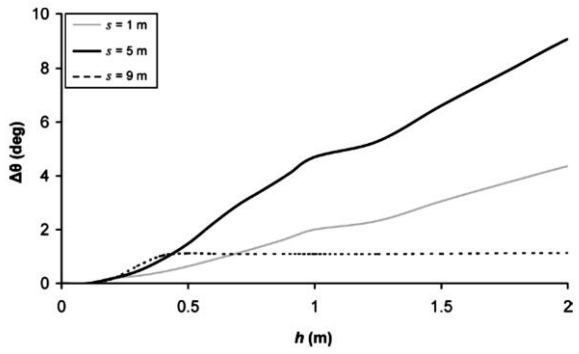


圖 6.1.3 基礎所在位置與其旋轉角隨錯動量變化之關係(Anastasopoulos 等人, 2009)

研究中亦針對基礎版載重之不同進行探討，主要模擬之載重代表 4 層樓與 8 層樓高之載重，為一般民宅常見之樓層，由研究結果圖 2.1.4 可以得知，當基礎版位於上盤時，載重愈大，斷層剪應變集中帶會往下盤方向發展，且其基礎旋轉角會愈小，基礎版受力狀況接近簡支樑；當基礎版橫跨斷層帶時，當載重愈大，次要之剪應變集中帶會愈加明顯，且其基礎旋轉角也愈小，當載重大於 40kPa(亦即約四層樓載重)後，基礎版與土層會完全接觸；當基礎版位於下盤位置時，其次要之應變集中帶會愈明顯，反向斷層亦可由分析結果看出，其基礎版受力情形會類似懸臂樑。此外，研究中針對基礎版之 EI 值進行變化，結果顯示其對於接觸應力或彎矩之發展影響並不大。

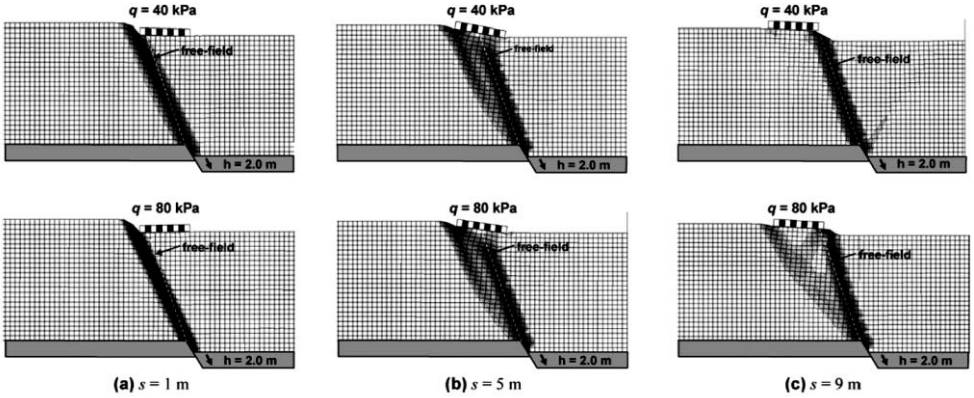


圖 6.1.4 基礎版所在位置與不同載重下造成剪應變帶發展情形

總結來說，對於條形基礎而言，大載重之基礎對於斷層錯動帶之發展方向有使其偏移之效果，可避免斷層破裂帶直接於基礎下方出現，而此一現象將伴隨基礎之剛體旋轉，可能使得基礎局部與土壤分離，造成基礎局部應力過大而破壞，此外，基礎載重的效果有二，其一使得斷層錯動造成不平的地表面變得較平，其二使得基礎下方之應力分佈較為集中，將斷層破裂帶導開，而由研究結果亦可以得知，不論基礎版相對於斷層位置為何，其所受接觸應力以及彎矩均會較原先狀態有相當程度之改變，工程設計上需就此一變化進行因應，以免屆時產生相當程度之基礎版損壞，進而造成建築物變形或倒塌。

Anastasopoulos et al (2009)亦針對淺基礎座落於砂土層，在逆斷層錯動下之

受力行為進行有限元素法分析，與前述正斷層之趨勢類似，在逆斷層錯動的過程之中，基礎版失去支撐的位置可由其與土壤之接觸應力判斷，其位置可能會在基礎版邊緣或是基礎版中間處，導致基礎版受到有如簡支樑或懸臂樑之受力狀況，使得所受彎矩可能與原先基礎版設計可承受彎矩不同，如圖 6.1.5 及圖 6.1.6 所示。圖 6.1.5 所示之結果為淺基礎座落位置與自由場下地表破裂點相交下之狀況，其位置分別位於逆斷層之下盤、中間以及上盤位置，當淺基礎位於逆斷層之下盤時，基礎版受力情形類似簡支樑受力狀況，當淺基礎跨過逆斷層或位於上盤時，其受力情形較類似基礎兩端點懸臂樑之狀況，其中又以完全位於上盤之狀況對於基礎版造成更大之不均勻彎矩。圖 6.1.6 所示為基礎版位於逆斷層上盤，但遠離自由場狀況下地表破裂點，由研究結果可以發現，雖然基礎版已稍遠離破裂帶，但對於基礎版所造成接觸應力或是彎矩亦有不均勻之現象，且部分基礎版亦與原先之受力及彎矩有明顯變大之趨勢，代表對於逆斷層而言，若基礎版位於上盤，且僅遠離破裂帶一小段距離(如一倍之基礎寬度)，則逆斷層錯動下還是可能使得基礎版受較大之應力或彎矩而破壞。

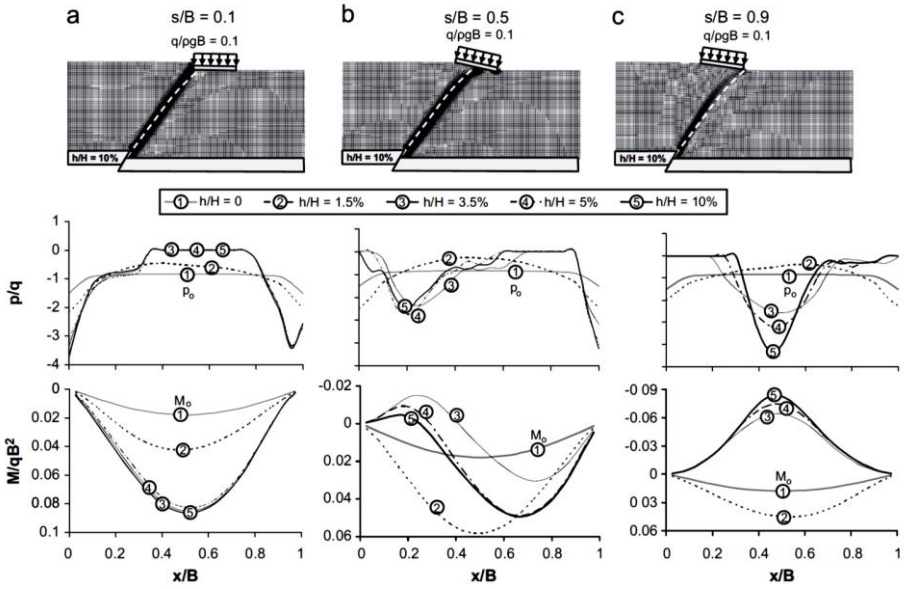


圖 6.1.5 淺基礎於逆斷層錯動下之接觸應力與彎矩分佈圖，基礎位置與自由場下之地表破裂點相交(Anastasopoulos 等人，2010)

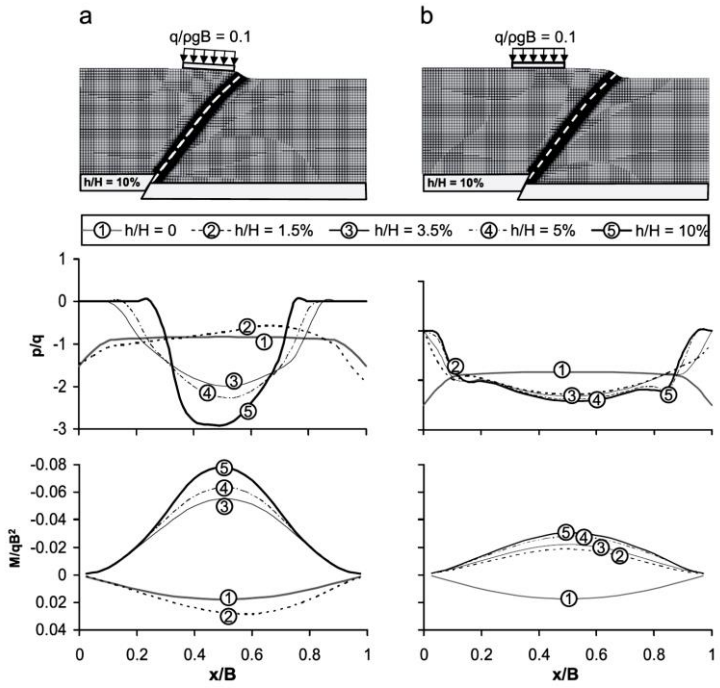


圖 6.1.6 淺基礎於逆斷層錯動下之接觸應力與彎矩分佈圖，基礎位置遠離自由場下之地表破裂點(Anastasopoulos 等人，2010)

此外，Anastasopoulos et al (2010)亦檢視淺基礎旋轉角之變化，如圖 6.1.7 所示。由圖可以得知，淺基礎旋轉角在小錯動量時(h/H 小於 2.5%)，不同位置對應之基礎旋轉角差異不大，但當錯動量再繼續增大時，其旋轉角有明顯差別，其中以淺基礎跨過斷層破裂帶之位置會有最大之基礎旋轉角，而當基礎完全位於上盤，且遠離斷層破裂帶，其對應之旋轉角最小。本研究中亦對於基礎重量(亦即樓房高度)進行其效益之探討，所得推論與 Anastasopoulos et al (2009)針對淺基礎位於正斷層之結論類似，基礎版重量可發揮兩種效果，其一為改變基礎下方土壤之應力場，使得破裂帶轉向；其二，該基礎應力可能也會壓縮土層表面，使得斷層錯動導致之土層表面不規則變形變平緩

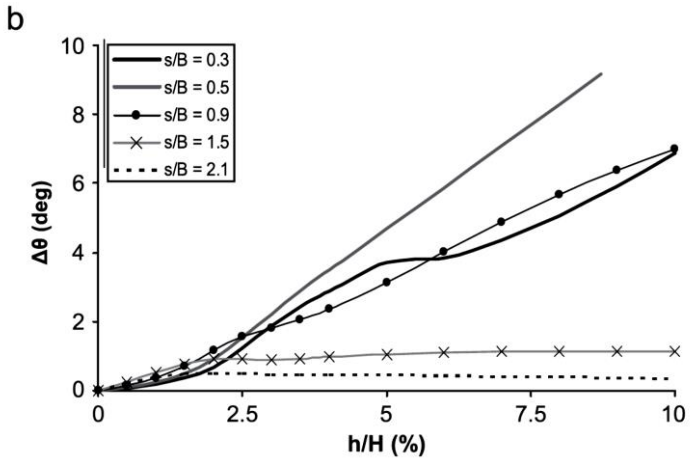


圖 6.1.7 淺基礎於逆斷層錯動下在不同位置及錯動量下之旋轉角變化 (Anastasopoulos 等人，2010)

Anastasopoulos et al (2010)亦就上述研究結果，提出淺基礎在受到逆斷層錯動影響下之簡化分析法，主要是藉由減少基礎下方之土壤溫克彈簧，將失去支撐之部分的土壤彈簧去除，在去除相關之土壤彈簧後，即可利用傳統之淺基礎分析法進行設計。

此外，Ahmed & Bransby(2009)亦針對座落於砂土層之淺基礎相對於逆斷層在不同位置下之行為進行離心模型試驗，其試驗之原型土層厚度為 15 公尺，逆斷層錯動量為 5 公尺。在與自由場狀況下之錯動結果比較之後，研究結果有關於淺基礎位置與其旋轉角或其互制機制亦與前述研究結果類似，研究中亦針對不同淺基礎位置提出三種基礎與土壤互制關係，分別為上盤機制(hanging wall mechanism)、下盤機制(footwall mechanism)以及分離機制(gap mechanism)，如圖 6.1.8 所示；而圖 6.1.9 為上述機制在淺基礎於不同位置以及斷層錯動量下之變化情形，由於分離機制可能會使得土壤與基礎底版不完全接觸，因此可能會造成基礎版受力與彎矩與初始設計值不同，亦需於設計中特別考量斷層錯動之影響。

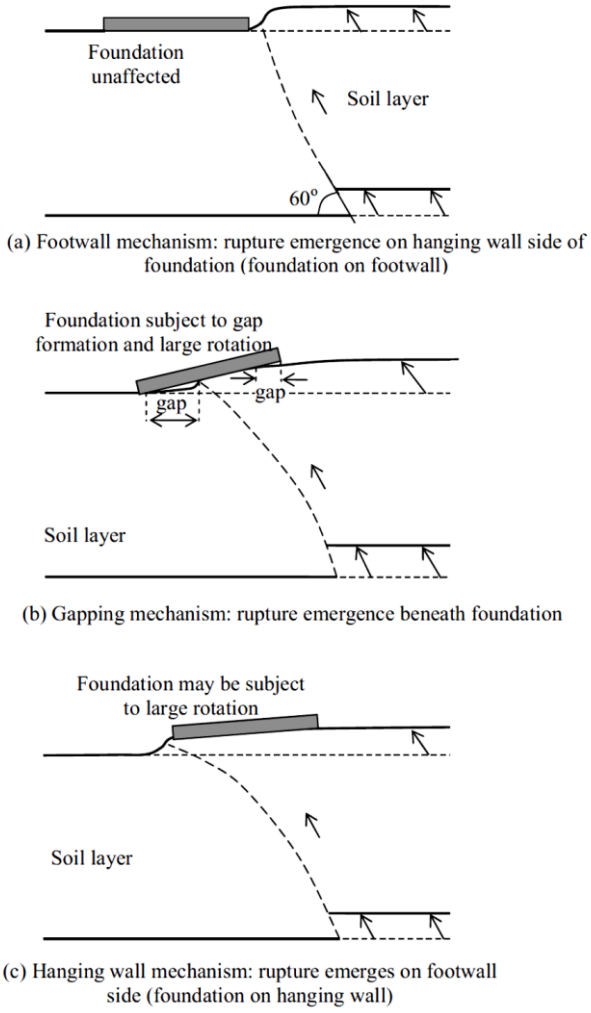


圖 6.1.8 土壤與座落於砂土層之淺基礎在逆斷層錯動下之互制機制(Ahmed 與 Bransby，2009)

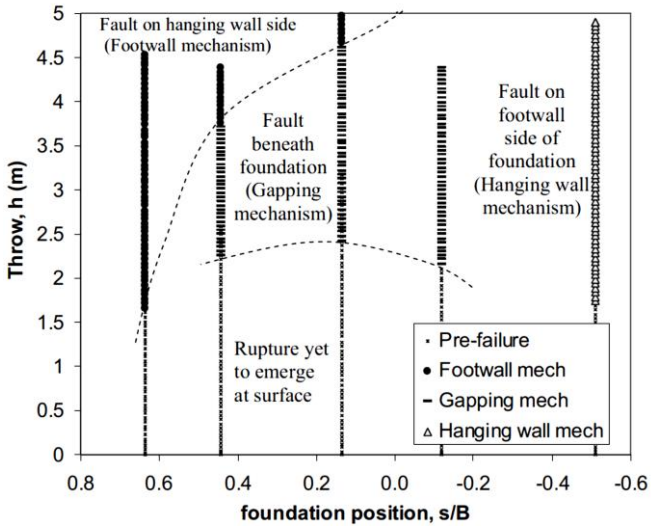


圖 6.1.9 淺基礎位置與斷層錯動量造成土壤與基礎互制機制之關係(Ahmed 與 Bransby，2009)

6.1.2 樁基礎

Anastasopoulos et al (2013)針對 2 x 4 群樁基礎座落在中等緊密砂土層與正斷層錯動之互制行為進行探討，此處模擬群樁之承載力來源主要為表面摩擦力，如圖 6.1.10 所示。本研究中針對群樁所在位置以及斷層錯動量進行探討，初步研究發現，即使僅為 0.5 公尺的斷層錯動量，群樁即會產生結構上的損壞(在鋼筋比較低的狀況下)，樁帽以及上方結構也可能伴隨大量的旋轉量以及位移。

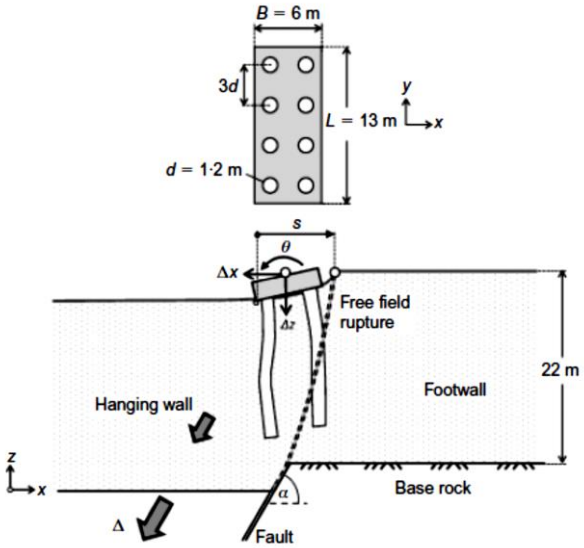


圖 6.1.10 群樁與斷層錯動模擬示意圖(Anastasopoulos 等人，2013)

此外，研究結果亦指出樁基礎若跨過自由場狀況下之斷層破裂帶，則群樁基礎之受力情形會變得相當不均勻，此一狀況使得群樁的一排樁會受到斷層向下位移之拉扯，而另一排則因為有樁帽的束制而保持不動，此一狀況讓第一排樁的樁帽處會有過大的彎矩產生，同時此處也會有大量旋轉與水平位移，如此一來，樁帽的設計即變得非常重要，可能要針對其厚度以及配筋量在此狀況下進行設計(若要使用樁基礎的話)，而由於樁帽本身有極大之差異沉陷發生，亦需特別注意基礎上方建築物是否能抵抗此一差異沉陷，如圖 6.1.11 所示。

此外，若斷層破裂帶在自由場狀況下會與群樁的前排相交，如圖 6.1.12 所示，則在此位置之群樁會使得破裂帶轉向並沿著前排樁向上發展，使得斷層錯動出露在樁帽前緣的地表處，在此情形下，樁帽位移以及樁的受力均不如上述位置大，

為樁基礎與斷層錯動下之較好的位置選擇。若斷層錯動於地表之出露點位於樁帽外圍某一距離下(例如一倍樁帽寬度，如圖 6.1.13 所示)，則此一狀況代表地底斷層破裂帶可能會通過群樁之樁尖處，進而發生過大之樁旋轉與彎曲。由上述討論看來，若斷層線附近可能有施作樁基礎之可能性，對工程設計上較佳的選擇是位於正斷層下盤之樁基礎，但由於正斷層錯動相對應於樁基礎之出露點較難預估，若為其他兩種說明的狀況，則對於樁結構本身或是上部結構均會產生極大的影響，需特別注意。

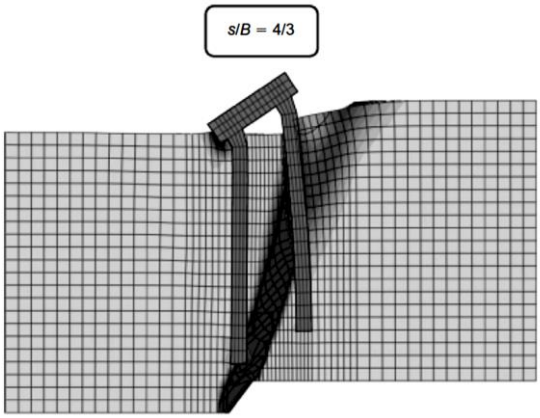


圖 6.1.11 緊砂狀況下群樁與斷層錯動互制情形(s/B=4/3，Anastasopoulos 等人，2013)

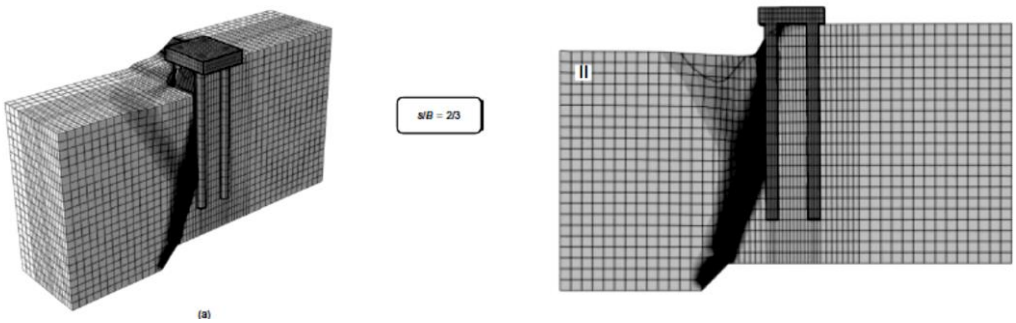


圖 6.1.12 緊砂狀況下群樁與斷層錯動互制情形(s/B=2/3，Anastasopoulos 等人，2013)

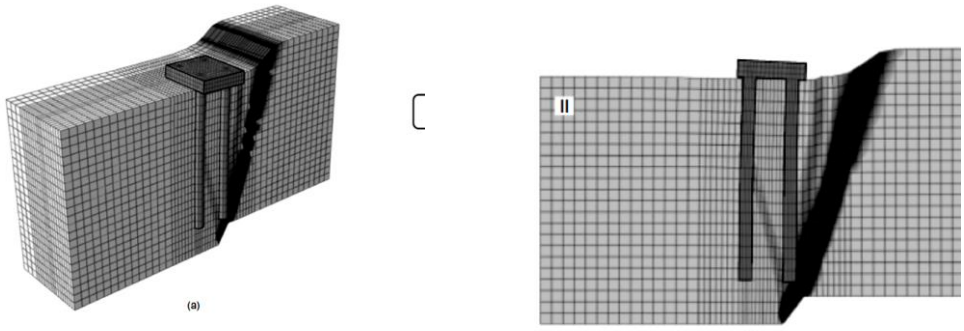


圖 6.1.13 緊砂狀況下群樁與斷層錯動互制情形(s/B=2，Anastasopoulos 等人，2013)

上述關於正斷層與樁基礎錯動之討論均針對承載力來源主要為表面摩擦力之群樁，若承載力來源主要為樁尖之點支承力，則根據作者的研究(Anastasopoulos et al,2008)此類樁的工程表現更差，更不適合在斷層附近施作。

此外，關於 921 集集大地震引起的建築物破壞已有許多學者進行研究，針對逆斷層與樁基礎之間的互制關係，陳正興等人(2003)及周鴻昇等人(2000)以現地調查了解現地基樁破壞機制，有關於基樁相對於逆斷層破裂帶之位置，上述學者在包尾山、平林溪、鳳梨山以及濁水山進行基樁遭到逆斷層錯動下之位移及損壞分析。位於上述位置之基樁均為國道三號興建之初，相關橋樑所預計使用之樁基礎，且其樁徑大多為 1.2~1.5 公尺左右，地震發生時基樁亦剛興建完成，尚未有上方結構物之影響。表 6.1.1 為相關位置之基樁之受損壞情形，而圖 6.1.14 為各基樁相對於逆斷層位置，由相關圖表可以得知，位於包尾山之基樁，其位於上盤處之基樁有水平位移約 0.9-2.5 公尺，而樁頭垂直位移隨距離斷層愈遠而愈大，由於整個樁身都位於上盤，樁本身的傾斜角度皆不大，只有輕微受損；對於位於下盤處的樁而言，在距斷層 100 公尺內的樁，其位移方向遠為遠離斷層，伴隨 4 到 8 公分之垂直向上之位移，傾斜角度約為 1.5~5 度。包尾山場址在距斷層 100 公尺以外之處，樁身即不會受到斷層錯動位移之影響。就平林溪場址而言，樁的破壞模式類似包尾山，但因其所在位置之淺層土壤較為堅硬，因此此處亦有施作淺基礎，直接位於破裂帶上之淺基礎則受到嚴重損壞。對於鳳梨山場址而言，此處基樁位於三角剪切帶，有約 2 公尺之向上抬升位移，其斷層破裂帶之傾角也相

對較陡。針對濁水山處之基樁而言，由於斷層破裂帶直接穿過基樁，使得基樁直接被剪斷(圖 6.1.15)，但同一位置位於下盤之基樁並沒有明顯的傾斜裂縫或是損壞產生。綜合上述，位於車籠埔斷層上盤之樁基礎，其水平及垂直位移大約為 2 公尺及 1.5 公尺 因為樁在設計時並未考量斷層錯動造成近地表變形之影響，大多數位於上盤且靠近破裂帶之基樁均遭到較為嚴重之損壞，而在下盤的基樁則沒有太多位移。

表 6.1.1 車籠埔斷層錯動造成樁基礎損壞及位移調查結果(周鴻昇等人，2000)

橋梁距離	調查樁數	與斷層距離(m)*	樁徑/樁長(m)	樁頭變化		調查結果	研判基樁與斷層之位置關係
				水平(cm)	垂直(cm)		
包尾山	28	10~196	1.5~1.2/9~30	18~270	8~165	基樁傾斜、輕微裂縫或無明顯損壞現象	基樁位於上下盤及斷層相交位置
平林溪	2	141	1.5/29,33	225	171	輕微裂縫或無險損現象	基樁位於上盤
		95		237	148		
鳳梨山腳下投 25 道路路旁	1	8	1.5/30	11	176	輕微裂痕或無明顯損壞現象	基樁位於下盤，但距主斷層破裂處非常近
濁水山擋土排樁	1	200	1.2/10	314	---	輕微裂痕或無明顯損壞現象	基樁位於上盤
濁水山南端	2	0	1.5/25	139	45	基樁分別於 19 及 9 公尺以下，由於地層受地震錯動影響，基樁至少側移 1/2 樁徑(約 75cm)以上	主斷層錯動面可能通過基樁
				125	80		

*與斷層地表破裂處之最近距離

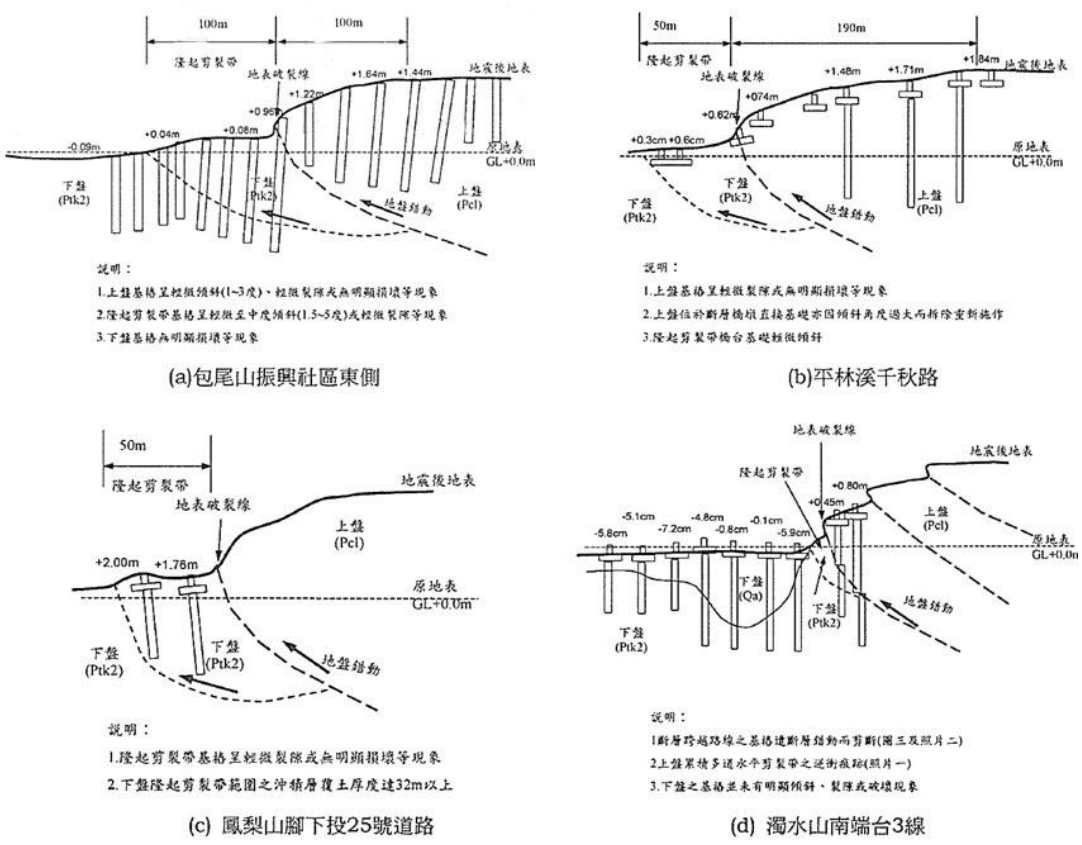


圖 6.1.14 斷層相交區域推估之隆起剪裂帶破壞示意圖(周鴻昇等人，2000)

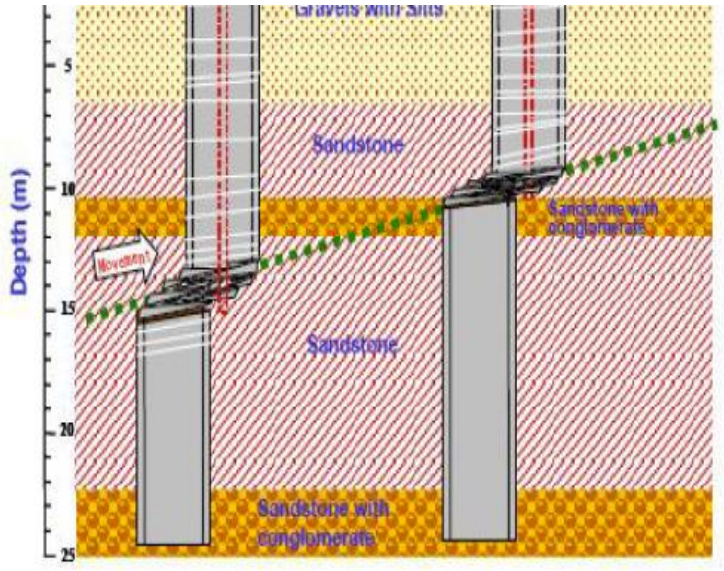


圖 6.1.15 濁水山南端斷樁破壞示意圖(Chen et al., 2003)

6.1.3 沉箱基礎

沉箱基礎(Caisson Foundation)常用於河海港、碼頭、電塔或橋樑基礎，其埋置深度與淺基礎相較稍深，一般而言沉箱基礎之剛度較淺基礎大，因此斷層錯動

造成土層變形後，對其行為亦會有不同的影響。Anastasopoulos et al (2012)對沉箱基礎在正斷層錯動下之行為進行研究。研究中使用離心模型以及數值模擬進行比對及驗證，並在後續數值分析中採用參數分析，以歸納沉箱基礎以及斷層破裂帶在正斷層錯動下之變形及位移特性。如同前述淺基礎及樁基礎，研究參數為沉箱相對於斷層之位置(s/B)，以及斷層錯動量。模型中沉箱尺寸以及深度固定，並座落於緊密乾砂土層中，如圖 6.1.16 所示。

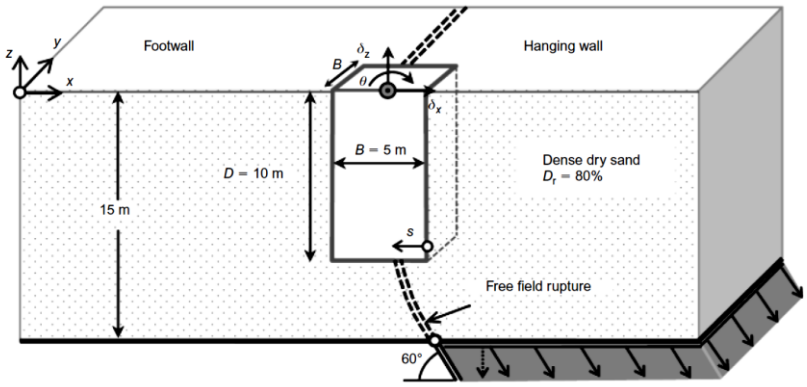


圖 6.1.16 沉箱基礎與斷層錯動模型示意圖(Anastasopoulos 等人，2012)

研究結果指出，沉箱與斷層錯動互制與位移關於主要可以由其所位置分為三個機制，機制一中沉箱主要位於上盤處(s/B<-0.4)，當斷層破裂帶(自由場狀況下)靠近上盤的沉箱邊緣，則破裂帶會向沉箱靠上盤側轉彎，此時對應之沉箱位移及旋轉角皆偏小；機制二中自由場狀況下破裂帶位於沉箱底部位置(s/B 在-0.4 到 0.6 之間，如圖 6.1.17、圖 6.1.18 所示)，若是此一狀況，則其破裂帶發展可能有四種情形，情形 1 為破裂帶在沉箱兩側產生分枝，情形 2 為破裂帶在沉箱底部分佈範圍變廣，情形 3 為在沉箱靠下盤處產生主動破壞面，情形 4 為在沉箱靠上盤處產生被動破壞面，此一機制的破壞皆會伴隨基礎之旋轉、水平及垂直位移，若橋樑等設施所在之沉箱位置為此一地方，則此一破壞機制可能會使得沉箱水平位移過大而可能有落橋之狀況發生。機制三為破裂帶通過沉箱靠近斷層下盤處(s/B>0.6，如圖 6.1.19 所示)，在此狀況下，破裂帶會被導向靠近下盤的沉箱側發展，沉箱會向下小幅沉陷以及旋轉。由於斷層相對於沉箱出露位置事前並無法得知，對於相

關設施，研究中亦建議針對垂直、水平以及基礎旋轉角進行所在位置之敏感度模擬，以求得其可能之變形值，並回饋至沉箱結構設計。

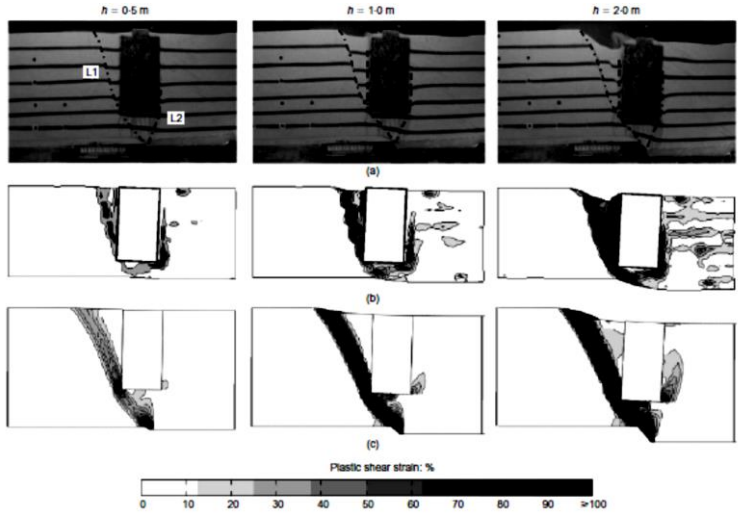


圖 6.1.17 沉箱基礎與斷層錯動互制關係，s/B=0.58，上排為離心機試驗結果，中排為 PIV 所得之塑性剪應變發展情形，下排為有限元素模型所得塑性剪應變分佈情形(Anastasopoulos 等人，2012)

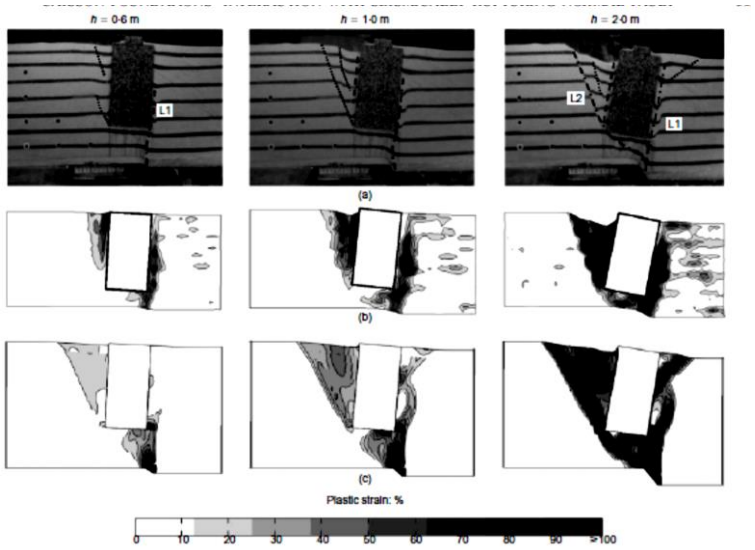


圖 6.1.18 沉箱基礎與斷層錯動互制關係，s/B=0.28，上排為離心機試驗結果，中排為 PIV 所得之塑性剪應變發展情形，下排為有限元素模型所得塑性剪應變分佈情形(Anastasopoulos 等人，2012)

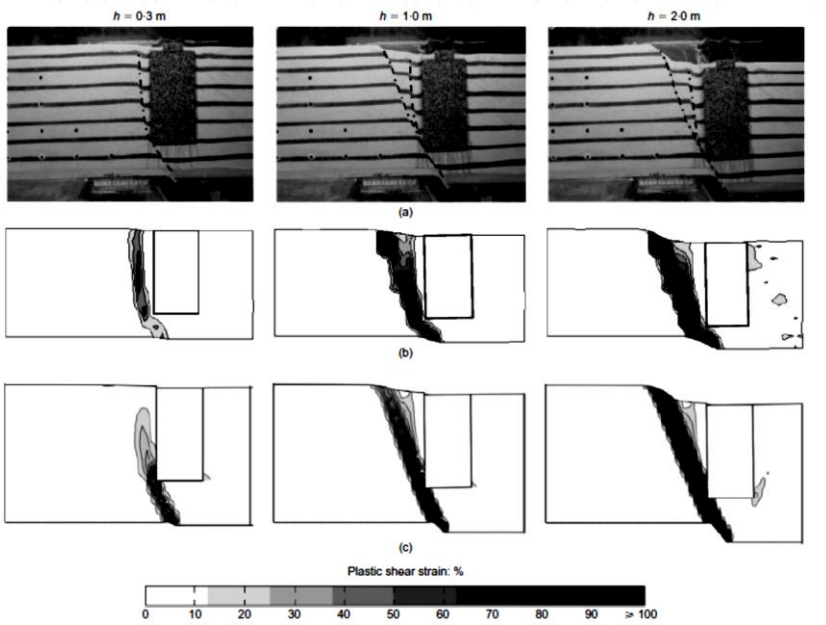


圖 6.1.19 沉箱基礎與斷層錯動互制關係，s/B=0.78，上排為離心機試驗結果，中排為 PIV 所得之塑性剪應變發展情形，下排為有限元素模型所得塑性剪應變分佈情形(Anastasopoulos 等人，2012)

此外，Anastasopoulos 等人(2011)亦針對沉箱基礎在逆斷層錯動下之行為進行探討。研究中亦使用離心機試驗模擬沉箱基礎位於砂土層中，受到逆斷層錯動下之行為，如圖 6.1.20 所示。研究中討論斷層破裂帶之發展與沉箱相對於斷層在不同位置下之關係，其結果指出，由於沉箱的相對較高的剛度，使得斷層破裂帶在逆斷層錯動時，可能會轉向，甚至沿著沉箱兩端發展成兩個分支，此一研究結果亦與 Gazetas et al (2008)之結論相同；破裂形態以及沉箱位移或旋轉之反應與沉箱相對於斷層之位置有明顯之關係，如圖 6.1.21 所示，其沉箱與逆斷層破裂帶互制之機制依其位置可以分為三類：(1)當自由場狀況下之斷層破裂帶跨過沉箱右側時，此位置之斷層破裂帶會被導向上盤，使得沉箱幾乎位於下盤，此狀況下沉箱會有大量旋轉角產生，斷層破裂帶會擦過沉箱右側，導致沉箱右側與土壤有大量剪位移產生，由圖 6.1.22 中亦可看出此一機制，車籠埔斷層造成圖中之高壓電塔下方之沉箱基礎產生大量旋轉角，其相對於斷層位置即在破裂帶之右側；(2)當自由場狀況下之斷層破裂帶大約略過沉箱右側的基底處，其斷層破裂帶會開始產生分枝，但位於沉箱左側之剪裂帶發展並不明顯，此外，由於斷層剪裂帶之發展，使得沉箱兩側的土壤產生剪力破壞，沉箱有大量的旋轉以及位移；(3)若沉

箱位於自由場狀況下之斷層破裂帶偏左處，則斷層破裂帶會被導向下盤處，而在沉箱右側偏上盤處，則會有明顯的土壤/沉箱介面滑動機制產生，此一位置會有最大的垂直位移，且與斷層上盤一起運動。若沉箱位置繼續向上盤移動，則剪裂帶再度集中成一條剪裂帶，且略過沉箱左側並向上盤發展。

由研究結果亦可以得知，沉箱存在於土層中時，會使得逆斷層錯動造成之影響範圍變大，就本研究的模擬狀況而言，其影響範圍約為沉箱寬度的三倍以上，以數值分析的結果看來，若要在模擬中避免邊界效應，則邊界應該在沉箱寬度的5倍距離外。其次，雖然此研究中模擬之狀況僅為固定沉箱尺寸、土層相對密度以及沉箱載重下進行，但作者認為以上三個因素亦會影響沉箱在斷層錯動時之位移及旋轉反應，特定沉箱計畫建議可以由數值分析取得其在斷層錯動下之反應，並回饋至工程設計中。

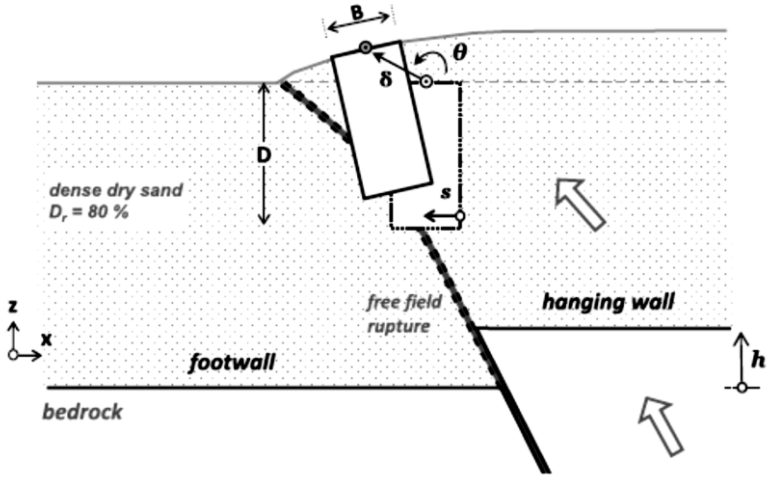


圖 6.1.20 逆斷層錯動對沉箱基礎影響參數示意圖(Anastasopoulos 等人，2011)

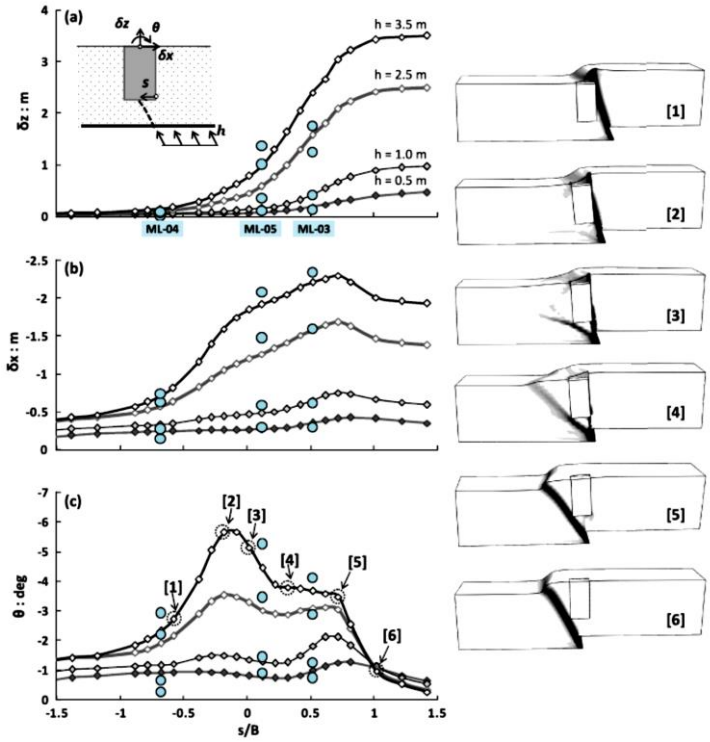


圖 6.1.21 不同沉箱位置在逆斷層錯動下造成(a)沉箱垂直位移；(b) 沉箱水平位移；(c) 沉箱旋轉角度以及(d)土層剪裂帶發展之關係(Anastasopoulos 等人，2011)

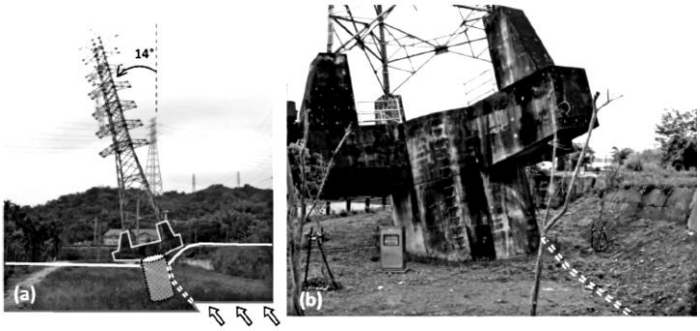


圖 6.1.22 車籠埔斷層對臨近高壓電塔之沉箱基礎產生位移之形態(照片由 Marianna Loli 拍攝，Anastasopoulos 等人，2011)

Gazetas et al (2014)亦針對沉箱基礎在正斷層及逆斷層作用下之行為進行實驗以及 PIV 分析，如同前述與沉箱相關之研究，本研究亦針對沉箱在相對於斷層不同位置下之位移量進行探討，並以 PIV 分析其土壤之位移方向。其研究結果指出，不管是正或逆斷層，當斷層破裂帶與沉箱互制時，都會有不同的互制機制產生，其機制包含斷層破裂帶的轉向、分枝以及沉箱底部剪裂帶發散等形式，此一發現與上述文獻所得結果亦類似。

6.1.4 隧道

集集地震後，山岳隧道受到車籠埔斷層錯動時擠壓而產生嚴重損壞，由王文禮等(2001)及 Wang et al, (2001)針對在集集地震後調查的 57 個隧道中，其中有 49 個隧道發生大小不一之損壞。隧道受斷層錯動而導致損壞的情形大多是以襯砌發生裂縫方式產生，其裂縫之分佈情形有所不同，其受損壞的嚴重程度與地質狀況、相對於斷層之距離以及隧道的結構有關，如圖 6.1.23、圖 6.1.24 所示；由調查結果可以得知，受到最嚴重損壞的隧道大多位於逆斷層之上盤，隧道位於逆斷層之下盤或其他區域則受到的損壞較低，此外，位於上盤處受損壞的隧道中，以位於邊坡旁或靠近開口處之隧道受損較為嚴重，高覆土應力狀況下的隧道其受損情形較為輕微。

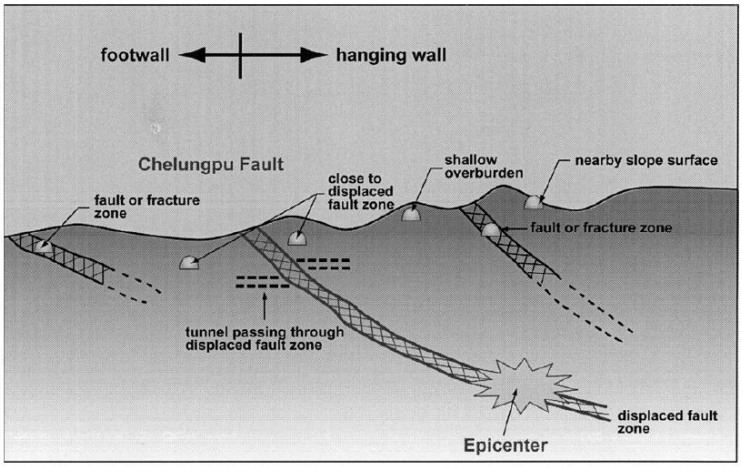


Fig. 3. Tunnel locations relative to Chelungpu thrust fault.

圖 6.1.23 隧道相對於逆斷層位置分佈圖(Wang et al., 2001)

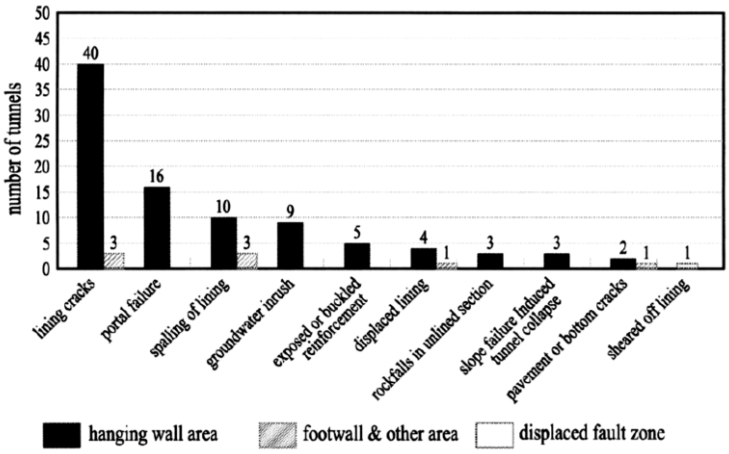


Fig. 4. The numbers of tunnels suffering various types of damage.

圖 6.1.24 隧道相對於逆斷層位置分佈圖(Wang et al., 2001)

Lin et al (2007)使用砂箱試驗以及有限元素分析逆斷層錯動對於埋置於砂性土壤隧道之影響，由研究結果可以得知，主要剪裂帶可能會因為隧道的存在而轉向或分成兩個分支，而土壤之鬆緊程度以及斷層傾角也對於三角剪切帶之發展、土層之應力發展以及隧道襯砌所受之應力有決定性之影響，就隧道所在位置而言，若隧道位於三角剪切帶之中，則主要剪裂帶(或分枝剪裂帶)可能會沿斷層滑動方向延伸。研究中亦針對臨近斷層之隧道在

Lin et al (2007)針對斷層錯動對隧道可能造成影響，建議可採取之災害防治措施如下：(1) 若潛在剪裂帶可以推估其大概位置(但可能相當困難，特別是對於山岳隧道而言)，且隧道位置可移動，則隧道位置應該要在逆斷層下盤處，如此可以避免逆斷層在向上抬升時，造成隧道在長軸方向造成破壞，若可能的話，也要遠離三角剪切帶。如果隧道位於逆斷層上盤或於三角剪切帶內，隧道之破壞不可避免。(2)如果隧道一定會靠近或位於三角剪切帶內， 則其三角剪切帶內之土壤勁度若能降低，則襯砌所受之應力可能減少；(3)若隧道位於三角剪切帶內，則可考慮將隧道與週遭土壤內施作緩衝區，則可能可以降低逆斷層錯動所造成之隧道變形。

除了上述之砂箱試驗之外，Baziar 等人(2014)亦針對位於砂土層中之隧道在受到逆斷層錯動下，進行離心模型試驗，研究中所採用的參數計有隧道深度(但隧道位置主要位於三角剪切帶內)、砂土相對密度以及隧道剛度(以模型厚度表示之)有關。由研究結果可以得知，隧道似乎亦可以將斷層破裂帶導開，但此現象可能會伴隨隧道本身大量之旋轉以及位移；此外，埋置深度較深之隧道會使得剪裂帶範圍更為擴大，同時使得地表變形較為不均勻，造成地表結構物之損壞。研究中針對離心試驗結果，提出位於不同深度之隧道與逆斷層互制之機制，如圖 6.1.25 所示。研究中所提結論如下：(1) 隧道埋置深度與斷層剪裂帶之發展有關，對於相對淺層之隧道(埋置深度較低)，其互制機制以圖 6.1.25 (c)為主，隧道兩側之主要破裂帶可以延伸至地表面。地表變形帶會比自由場狀況下之變形帶更寬。對於深層之隧道，其互制機制以圖 6.1.25 (d)為主，只有一條剪裂帶會延伸至地表面，此狀況下造成之地表變形帶會較圖 6.1.25 (c)之狀況寬。(2) 隧道剛度(本

研究以隧道厚度為其分別)會影響破裂帶之發展，剛度增加時，會使得應力集中於隧道兩側，使得斷層破裂帶方向改變，破裂帶並在隧道底部終止，如圖 6.1.25 (d)、(f)所示。(3)影響隧道旋轉角與位移之重要因素為隧道相對於斷層尖端之位置以及隧道剛度。當隧道非常靠近斷層尖端時，其旋轉量會最大，但位移會最小；當隧道位於逆斷層下盤或遠離斷層破裂帶，斷層錯動對隧道影響會較小，如圖 6.1.26 及表 6.1.2 所示。(4) 當土層中埋有隧道時，其造成之剪裂帶以及地表坡度均會比自由場狀況下還大，(5)土層相對密度會對於斷層破裂帶發展有一定之影響，當土層愈緊密時，斷層破裂帶可能不會延伸到地表面，且其破裂帶數量會減少。相對密度小的狀況會使得地表變形帶寬較相對密度大的狀況要大，如圖 6.1.25 (c)、(e)與圖 6.1.26 及表 6.1.2 中實驗編號 3 及 5 之比較。

表 6.1.2 隧道在不同試驗條件下之變形及位移特性(Baziar 等人，2014)

Test condition	Test number	W (m)	Number of ruptures	Number of scraps	Maximum surface gradient (degree)	Affected width on the soil surface (m)
Free field (D_r 50%)	1	18	4	2	24	20.5
Free field (D_r 70%)	2	17.5	2	2	27	20.5
Effect of shallow tunnel	3	21	4	3	30	23
Effect of deep tunnel	6	26.5	4	4	28	28.5
Effect of soil density	5	24	4	5	26	28.5
Effect of tunnel rigidity	7	26.5	4	3	23	29.5

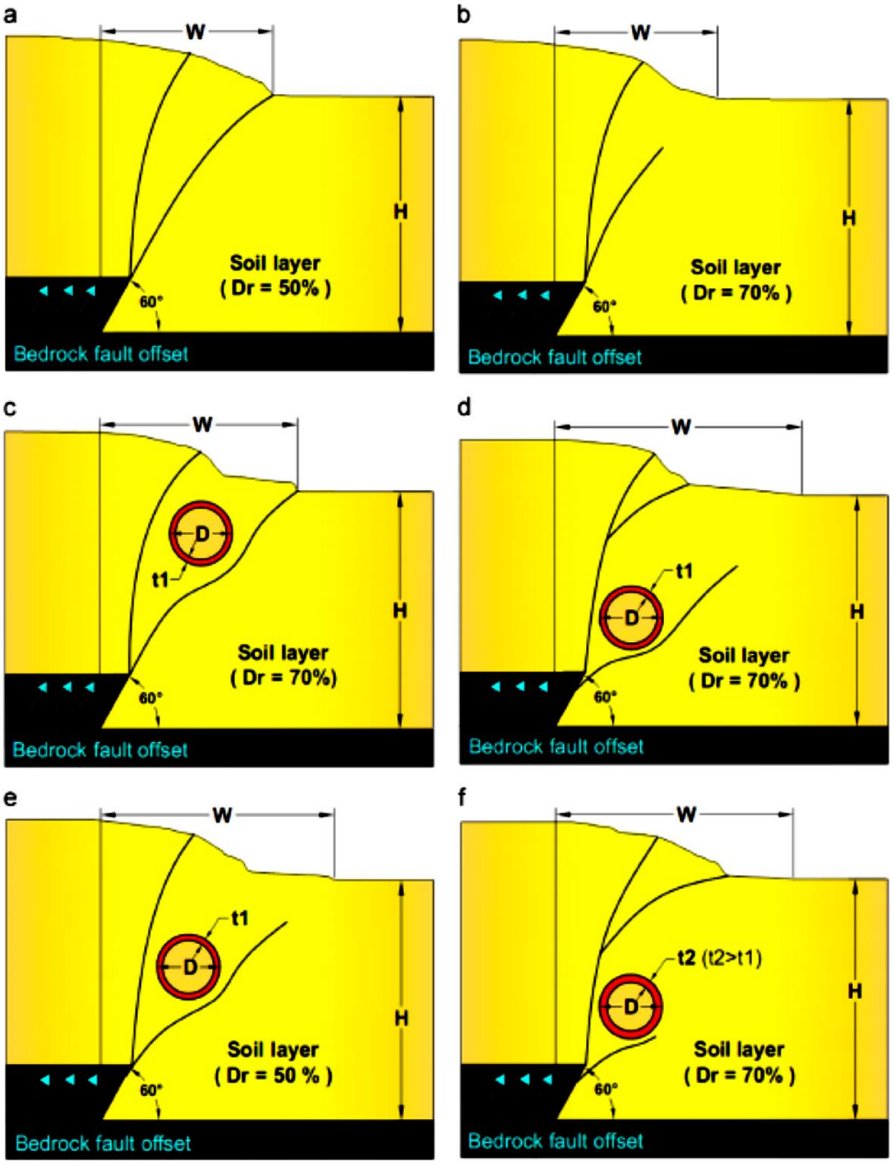


圖 6.1.25 逆斷層錯動與隧道互制機制(Baziar 等人，2014)

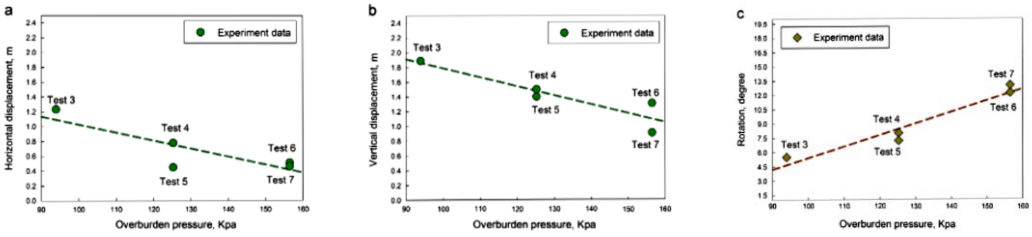


圖 6.1.26 隧道所在位置覆土應力(kPa)與(a)隧道水平位移，(b) 隧道垂直位移以及(c)旋轉角之關係(Baziar 等人，2014)

此外，Anastasopoulos & Gazetas(2010)針對特定(位於希臘的兩個明挖覆蓋高速公路隧道)隧道探討正斷層錯動下之位移反應，研究主要以有限元素法進行參數分析。研究結果指出明挖覆蓋隧道在適當工程設計下(考慮其彎矩方向之影響，以於適當位置增加隧道牆面之鋼筋比，但不需要增加牆或是底版厚度)，可以承受正斷層錯動所產生之變形，變形帶之發展與隧道之存在與否有明顯之關係，其效果可能會使斷層破裂帶轉向、分枝以及造成剪裂帶之發散。當隧道主體位於自由場破裂帶之下盤時(圖 6.1.27)，隧道受彎矩狀況會使其向上拱(hogging)；若隧道主體位於自由場破裂帶之上盤時(圖 6.1.29)，隧道受彎矩狀況會使其向下凹(sagging)；若斷層破裂帶通過隧道中間位置(圖 6.1.28)，會發現隧道之受力乃處於上述兩種極端狀況之間。

Anastasopoulos & Gazetas(2010)研究亦發現，隧道受到最大彎矩作用時並不是發生在有最大斷層位移量時，因此設計上亦要考慮在不同斷層錯動量下對隧道之影響。此外，在隧道存在的狀況下，斷層破裂帶並不會直接在隧道下方出露，而是以分散差異位移量之方式存在於隧道底部。此外，隧道上方之覆土重量有兩個作用，一個是向下推隧道，使得隧道下方的土壤受壓，將斷層錯動產生之不規則位移壓平，其二，增加隧道下方土壤之圍壓，使斷層破裂帶轉向、分枝或發散產生。由於此研究主要針對特定隧道進行分析，因此 Anastasopoulos 與 Gazetas(2010)亦於研究中建議針對特定隧道，若有其重要性，則可以依照研究中建議之方法進行分析，並在考慮不同斷層出露位置以及斷層錯動量下分析隧道受力及彎矩情形，以回饋至工程設計中。

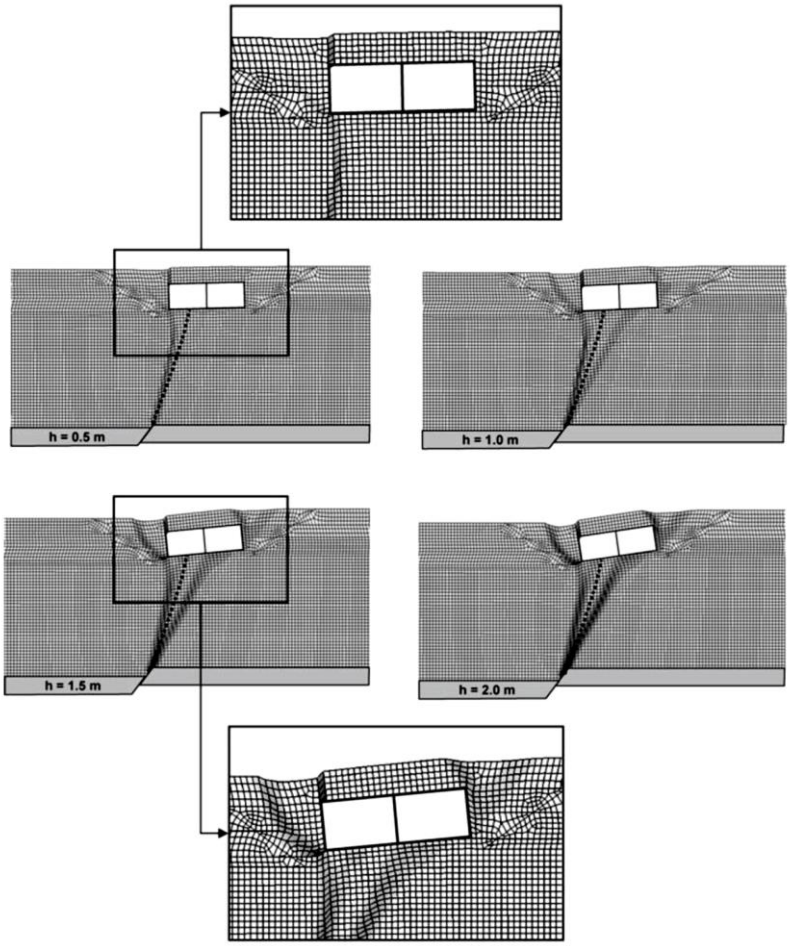


圖 6.1.27 明挖覆蓋隧道位於斷層破裂帶左側之地表與隧道變形反應(隧道主體位於偏下盤處，Anastasopoulos 與 Gazetas，2010)

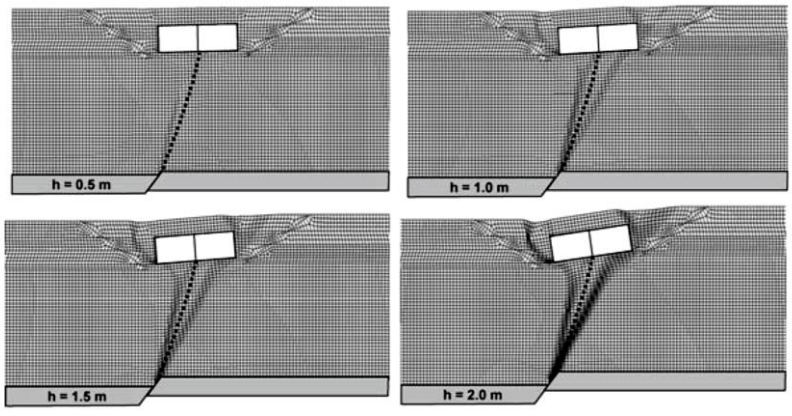


圖 6.1.28 明挖覆蓋隧道位於斷層破裂帶中間之地表與隧道變形反應(Anastasopoulos 與 Gazetas，2010)

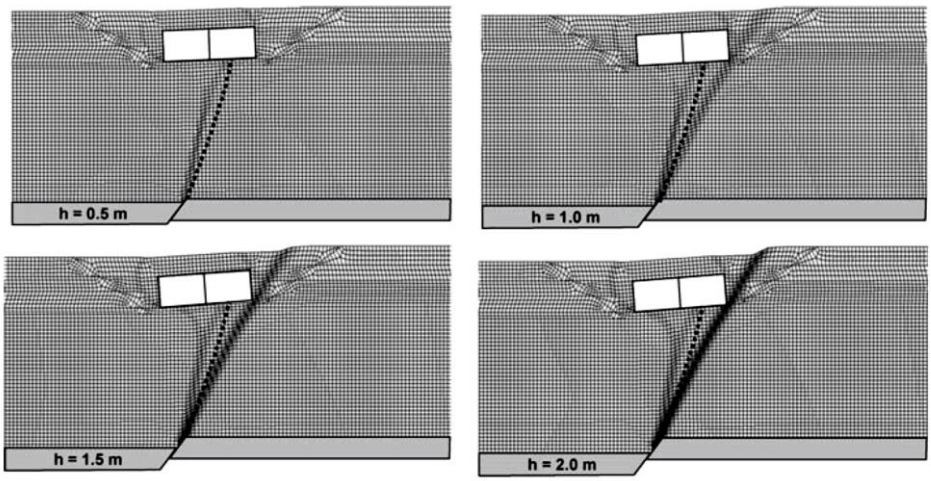


圖 6.1.29 明挖覆蓋隧道位於斷層破裂帶右側之地表與隧道變形反應(隧道主體位於偏上盤處，Anastasopoulos & Gazetas，2010)

Anastasopoulos et al (2008)亦針對較深層之隧道(70 公尺之覆土)在正斷層錯動下之變形行為進行探討。其結果亦顯示，在工程設計或施工中，若能保持隧道長軸方向之彈性(以較短之分段長度以及較厚之止水彈性襯墊)，則該隧道亦能夠抵抗其下 800 公尺處之 2 公尺正斷層位移。

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 & Oettle(2012)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，主要是以避開活動斷層附近之工程行為；然而就 Bray & Oettle(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 6.1.3 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 & Oettle(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)。而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 6.1.3 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 6.1.30 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。

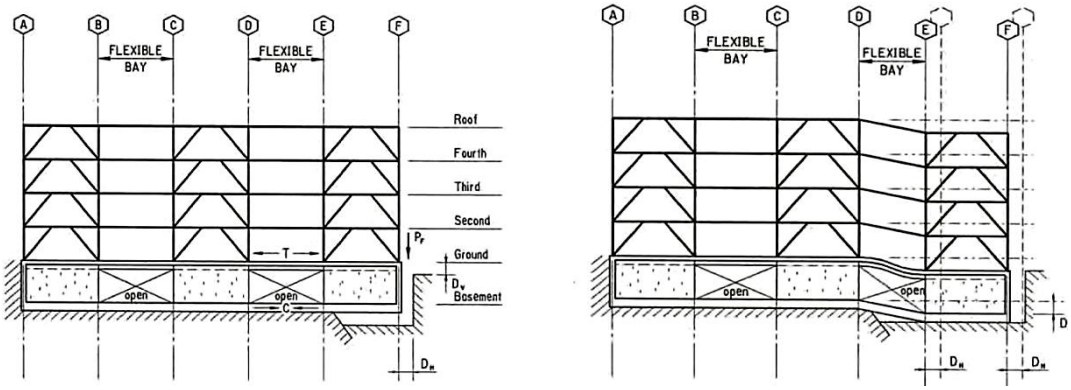


圖 6.1.30 結構物容許變形區與剛性區之設計概念(Bray & Oettle，2012)

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 & Oettle(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 6.1.31 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 & Oettle(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，進而使結構物本身產生基礎承載力不足而破壞的情形，此結論與上述關於樁基礎抵抗斷層錯動能力較低之討論亦類似。

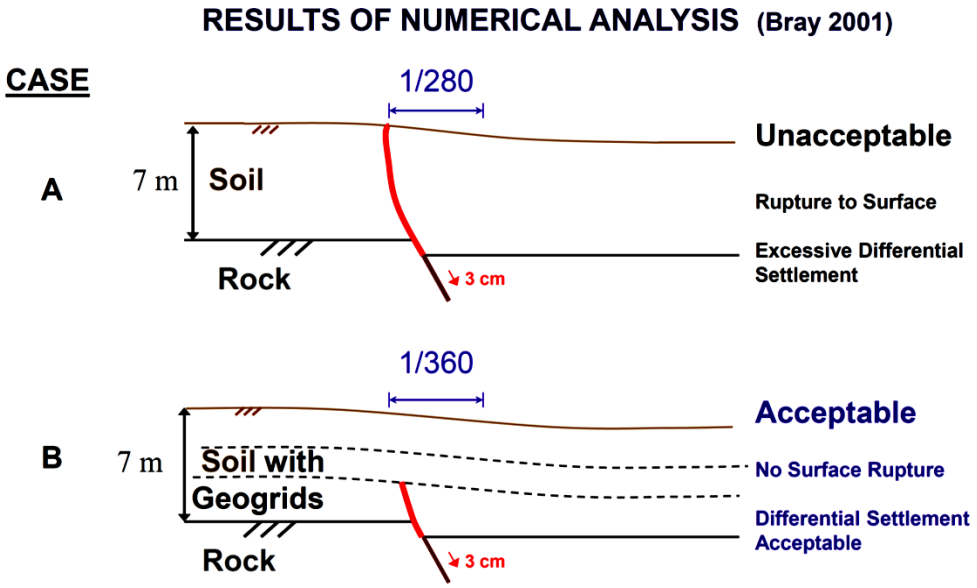


圖 6.1.31 使用地工格網進行道路加勁之工程處置方式(Bray & Oettle, 2012)

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 & Bray(2013)年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 6.1.32 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。

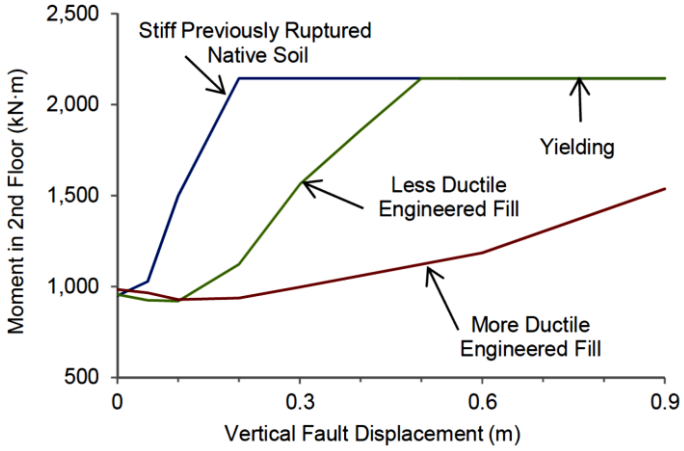


圖 6.1.32 不同勒性之覆土層在不同垂直位移下之樓地版彎矩值分佈圖

(Oettle & Bray, 2013)

(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 6.1.33(a)及(b)所示。

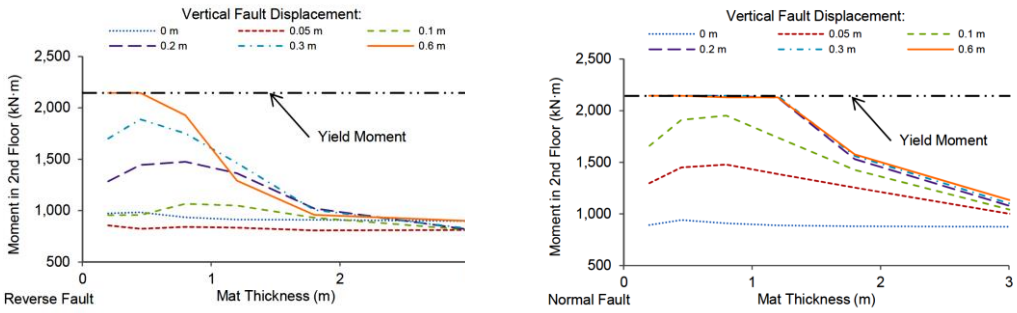


圖 6.1.33 筏式基礎厚度與樓地板彎矩及垂直變位關係圖。逆斷層(左圖)；正斷層(右圖)(Oettle & Bray, 2013)

(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 6.1.34 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。

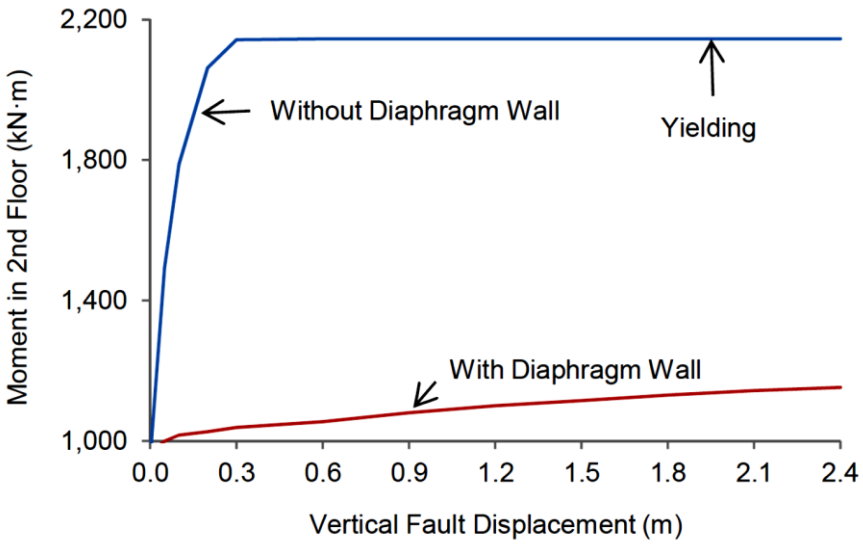


圖 6.1.34 連續壁對樓地板彎矩值及垂直變位之影響關係圖(Oettle & Bray, 2013)

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

準貫入試驗等現地實驗，另外，也可視情形取得劈管樣本(砂性土層)，或是薄管樣本(黏性土層)以利室內試驗之進行。

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

就現地試驗而言，一般常見有標準貫入試驗(Standard Penetration Test, SPT)以及圓錐貫入試驗(Cone Penetration Test, CPT)，標準貫入試驗之進行方式為利用重 64 公斤之落槌，並以 76 公分之落距以自由落體方式向下敲擊取樣管，並計算使得取樣管向下貫入土壤 15 公分之敲擊次數，共進行三次計 45 公分，並合計後二次之敲擊次數，此一次數稱為標準貫入試驗 N 值(SPT-N)，可做為評估現地土層之緊密程度或強度之依據，對於砂性土壤來說，當 SPT-N 值大於 30 時，其相對密度為緊密至非常緊密，對應之摩擦角常大於 35 度；而對於黏性土壤而言，一般較少利用 SPT-N 值推估相關力學參數，主要原因在於黏性土壤在受到快速載重之下，常因激發之超額孔隙水壓來不及消散，導致其有效應力大幅下降，而使得量測到之標準貫入試驗值偏低，因此，雖然經驗式中也有關於黏性土壤 SPT-N 值推估相關土壤力學參數，但使用上應較為小心。文獻中常提到可利用土

壤之一般物性參數或是現地試驗標準貫入試驗值推估土壤力學參數，以下就本研究中參考使用之經驗公式做一簡略之說明(Kulhawy 與 Mayne，1990)：

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

$$S_u = (0.11 + 0.0037 \cdot PI) \cdot \sigma_p' \qquad \text{式 6.1.1}$$

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

$$S_u = 29.4(N)^{0.72} \text{ (kPa)} \qquad \text{式 6.1.2}$$

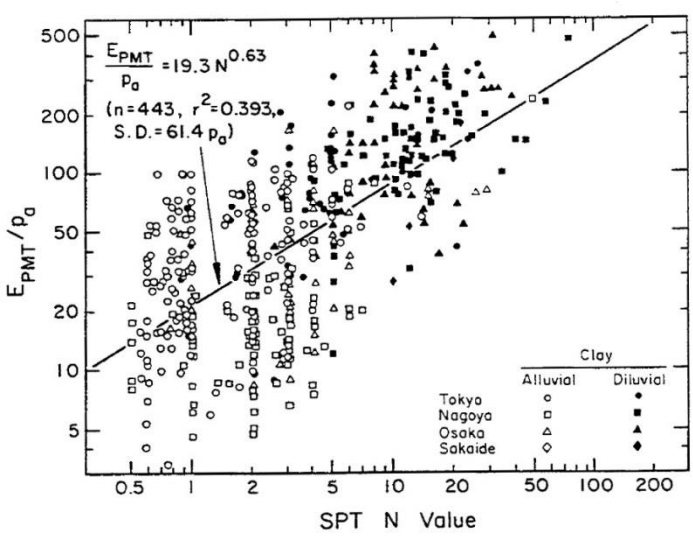


圖 6.1.35 以標準貫入試驗值推估黏性土壤彈性模數(Kulhawy & Mayne,1990)

對於黏性土壤之彈性模數而言，如圖 6.1.35 所示，其與標準貫入試驗值有一約略之相關函數，Ohya 等人(1982)提出以 SPT-N 值推估黏性土壤之彈性模數如下式所示：

$$E = 1955(N)^{0.63} \text{ (kPa)} \qquad \text{式 6.1.3}$$

就砂性土壤而言，以 SPT-N 推估土壤摩擦角以及相對密度，可參考表 6.1.4，而由於不同文獻中對於標準貫入試驗值對應之摩擦角有不同之建議，因此亦列於

表中((a)及(b)為來自不同文獻)供本計畫參考。另外可參照圖 6.1.36 利用土層所在位置之有效覆土應力(σv0')以及其對應之標準貫入試驗值(N)，查詢或計算相對應之摩擦角(ϕ)，圖 6.1.36 是利用 Schmertmann(1975)提出之經驗式繪製而成，經驗式如下式所示(Pa=101.3 kPa)：

$$\tan\phi \approx [\frac{N}{(12.2+20.3\frac{\sigma_{v0}'}{p_a})}]^{0.34} \qquad \text{式 6.1.4}$$

表 6.1.4 標準貫入試驗值與相對密度、摩擦角對照表(Kulhawy 與 Mayne，1990)

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

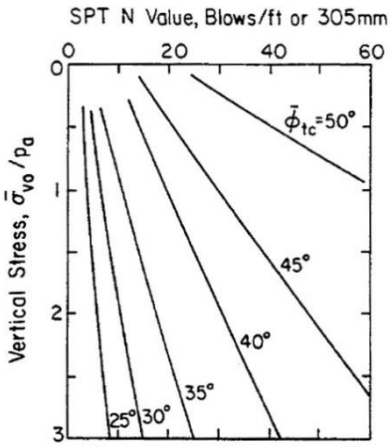


圖 6.1.36 標準貫入試驗值與摩擦角關係圖(Kulhawy 與 Mayne，1990)

另外，以 SPT-N 推估砂土彈性模數方面，由於模型分析內除了土層之力學參數外，亦需要描述其受力變形之參數，因此也以室內實驗或是標準貫入試驗 N 值搭配經驗公式推估，如表 6.1.5 所示：

表 6.1.5 砂層之正規化彈性模數對照表(Kulhawy 與 Mayne，1990)

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

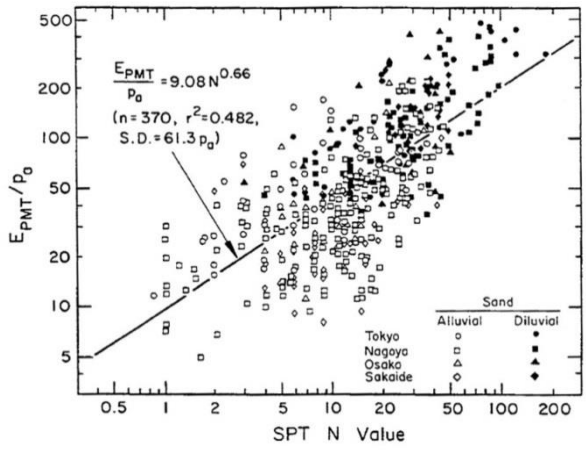


圖 6.1.37 標準貫入試驗值與正規化彈性模數關係圖(Kulhawy 與 Mayne，1990)

另外，砂土之彈性模數亦可利用標準貫入試驗值，以經驗公式推估其值，如下式以及圖 6.1.37 所示，其中 N60 代表標準貫入試驗 N 值對機具型式校正後之值，詳情可參閱土壤力學相關書籍。

$$E = 920(N)^{0.66}\ (\text{kPa}) \qquad \text{式 6.1.5}$$

$$E = 506.5(N_{60})\ (\text{kPa}) \quad (\text{僅適用於含細粒料之砂土}) \qquad \text{式 6.1.6}$$

$$E = 1013(N_{60})\ (\text{kPa}) \quad (\text{僅適用中等緊密純砂土}) \qquad \text{式 6.1.7}$$

$$E = 1520(N_{60})\ (\text{kPa}) \quad (\text{僅適用緊密純砂土}) \qquad \text{式 6.1.8}$$

另外，描述土壤變形之另一個重要參數為波松比(Poisson's Ratio)，波松比對土壤而言，為進行三軸試驗(或類似試驗)中，量測到之體積應變與軸向應變之函

數，或是徑向應變(εr)與軸向應變(εa)之比，如下式所示，由於相較於彈性模數來說，波松比之變化較小，因此，可參照如表 6.1.6 之建議值做為模型分析之用。

$$\nu = -\partial\varepsilon_r / \partial\varepsilon_a \qquad \text{式 6.1.9}$$

表 6.1.6 不同土壤之波松比(Kulhawy 與 Mayne，1990)

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

而由於經驗式之建立常需要大量的資料庫以求得最佳迴歸線，因此，上述經驗式之使用上，需注意其適用範圍，另外，由圖 6.1.35 或圖 6.1.37 亦可看出，即使利用現有資料得以求出相關之經驗公式，其相關係數有時會相當低，代表使用經驗公式所求得之參數，其變異性可能會很大，在此狀況下，對於所推估之參數，應該在合理的範圍內先行檢視，並與其他文獻互相比較，以使參數選取上更為多樣化。

6.2 剛性淺基礎版與逆斷層的互制效應及對斷層跡發展的影響

影響淺基礎版與逆斷層互制的因素(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。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，如圖 6.2.37 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

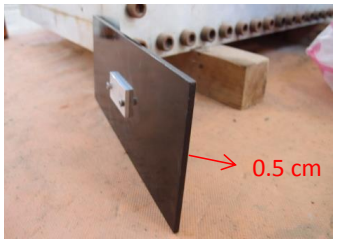
型試驗，其中%代表試驗時剛性基礎的種類（本研究共使用 A、B、C 及 D 四種不同基礎版）。圖 6.2.38 則為不同試驗，不同剛性淺基礎版與逆斷層跡，出露地表相對位置關係的示意圖。圖 6.2.39 及圖 6.2.40 為逆斷層錯動試驗不同垂直錯動量，B 基礎版在不同 s/B 的情況下，地表變形剖面之比較：(a)s/B=0；(b)s/B=0.69；(c)s/B=1；(d)自由場。圖 6.2.41 中則顯示座落於上盤的剛性淺基礎(s/B=1)，有較大的水平位移、垂直頂升量及旋轉角，但上盤的土壤不會覆蓋在基礎版之上。座落於下盤的剛性淺基礎(s/B=1)，有較小的水平位移、垂直頂升量及旋轉角，但上盤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 6.2.42 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，則應以被動土壓力來進行設計。

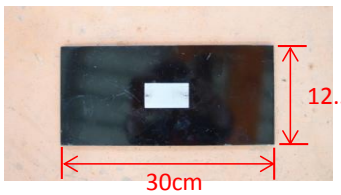
圖 6.2.43 及圖 6.2.44 為逆斷層錯動試驗，在不同 s/B 的情況下，B 基礎版對逆斷層跡出露地表位置及主破裂面範圍影響之比較。圖中顯示座落於上盤(s/B=0)或座落於上下盤間(s/B=0.69)的剛性淺基礎，會導致下主破裂面容易向下盤彎斜發展，因此上下主破裂面的範圍也較寬。而座落於下盤的剛性淺基礎(s/B=1)，由於基礎版的垂直載重，增加了基礎版底下土壤的有效應力，造成下主破裂面不容易向下盤發展，上下主破裂面的範圍相較基礎座落在上盤者為小，甚至也較自由場之主破裂面範圍為小。

圖 6.2.45 及圖 6.2.46 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=52.9 kPa)；(b) C 基礎(q=86.0 kPa)；(c) 自由場。圖 6.2.47 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 6.2.48、圖 6.2.49、圖 6.2.50 顯示淺基礎位於上下盤間，基礎荷載較大(q=86.0 kPa)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 6.2.51 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

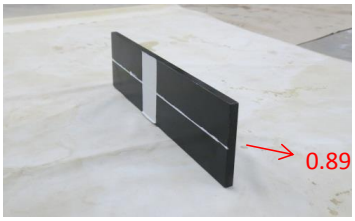
斷層跡出露地表位置及主破裂面範圍之比較：(a)基礎寬度=8.06 cm；(b) 基礎寬度=2.03 cm；(c) 自由場。圖 6.2.52 則為逆斷層試驗，在相同 s/B=0 的情況下，不同寬度的淺基礎版旋轉角、水平位移之比較。圖中顯示淺基礎位在上盤，較寬的基礎，有稍大的水平位移、垂直頂升量及旋轉角。圖 6.2.53 為逆斷層錯動試驗後，在相同 s/B=0 及相同載重的情況下，不同寬度的淺基礎版試驗後地表面斷層跡出露景象的比較。而圖 6.2.54 為逆斷層試驗，在相同 s/B=0 及相同載重的情況下，不同寬度的淺基礎版試驗後及自由場地下斷層跡出露景象的比較。試驗成果顯示，較寬的基礎版地表破裂跡出現在較遠離基礎版處，也有較多的砂土覆蓋於基礎版上。

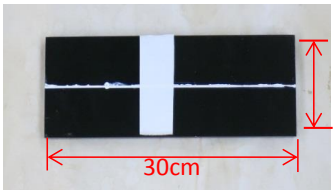
A-Footing





B-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

80g時之接觸應力：52.9 kPa

→模擬現地建築物為5層樓之情形

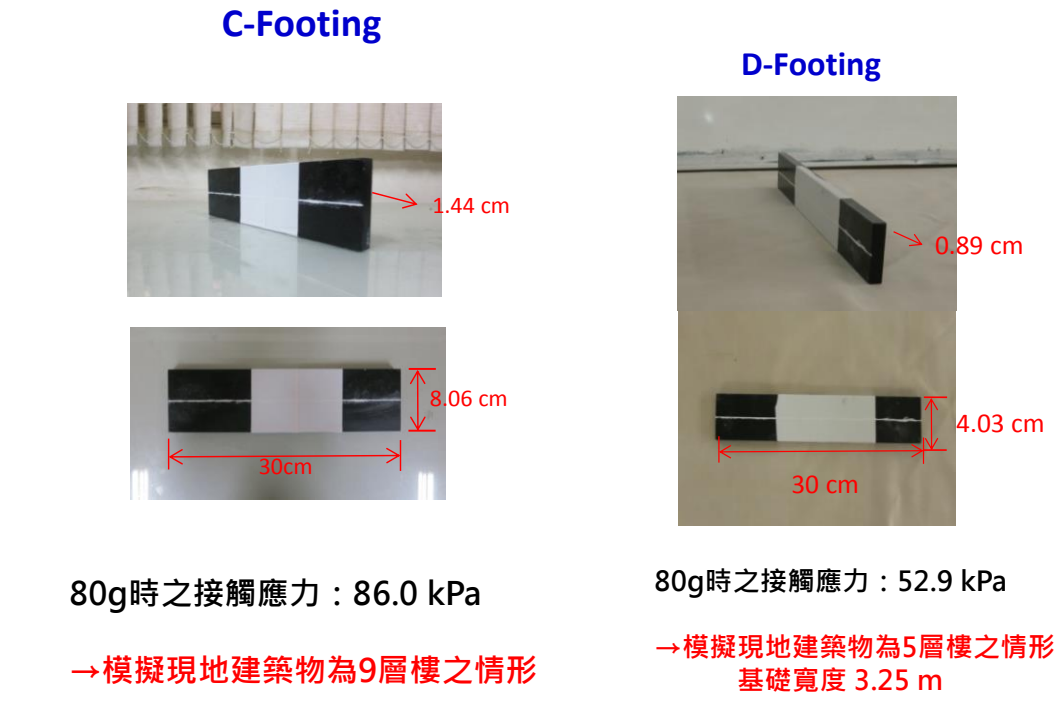


圖 6.2.37 A、B、C 及 D 剛性基礎版基本性質及照片

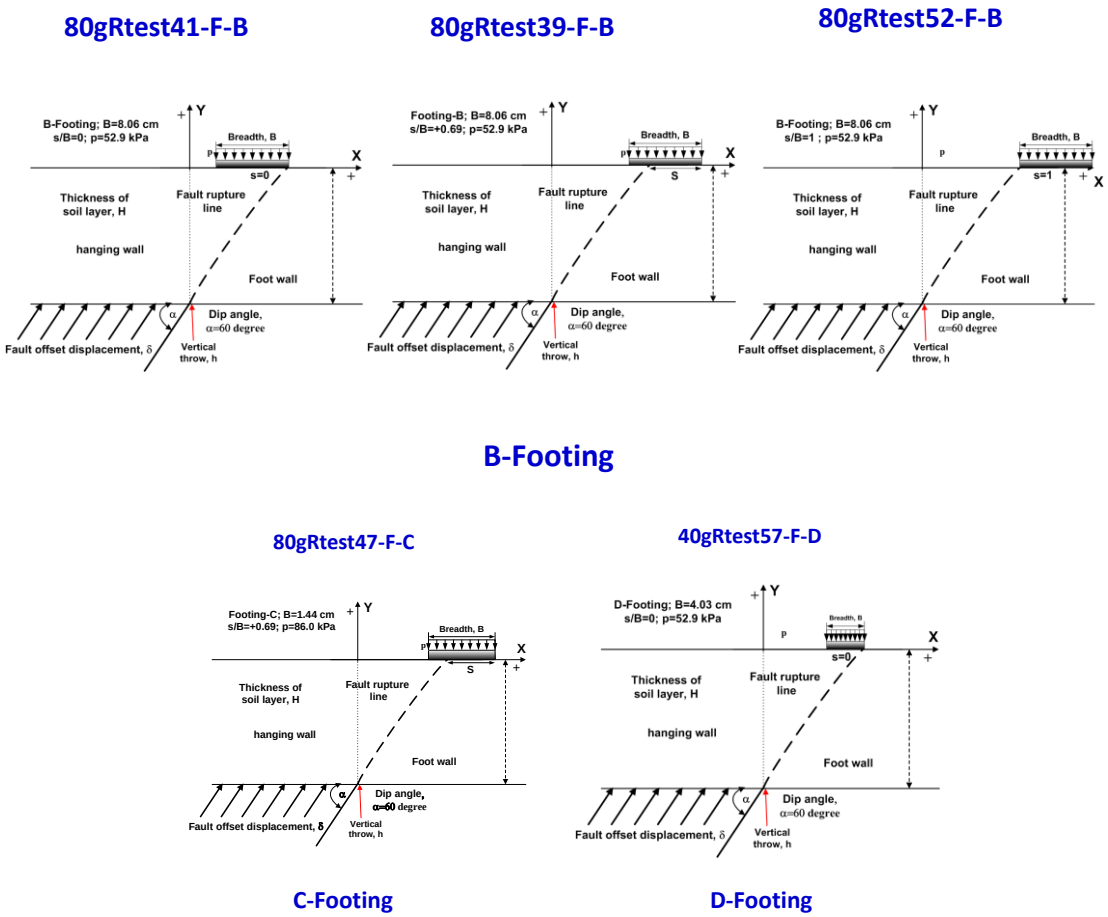


圖 6.2.38 不同試驗，剛性淺基礎版與逆斷層跡出露地表相對位置關係示意圖

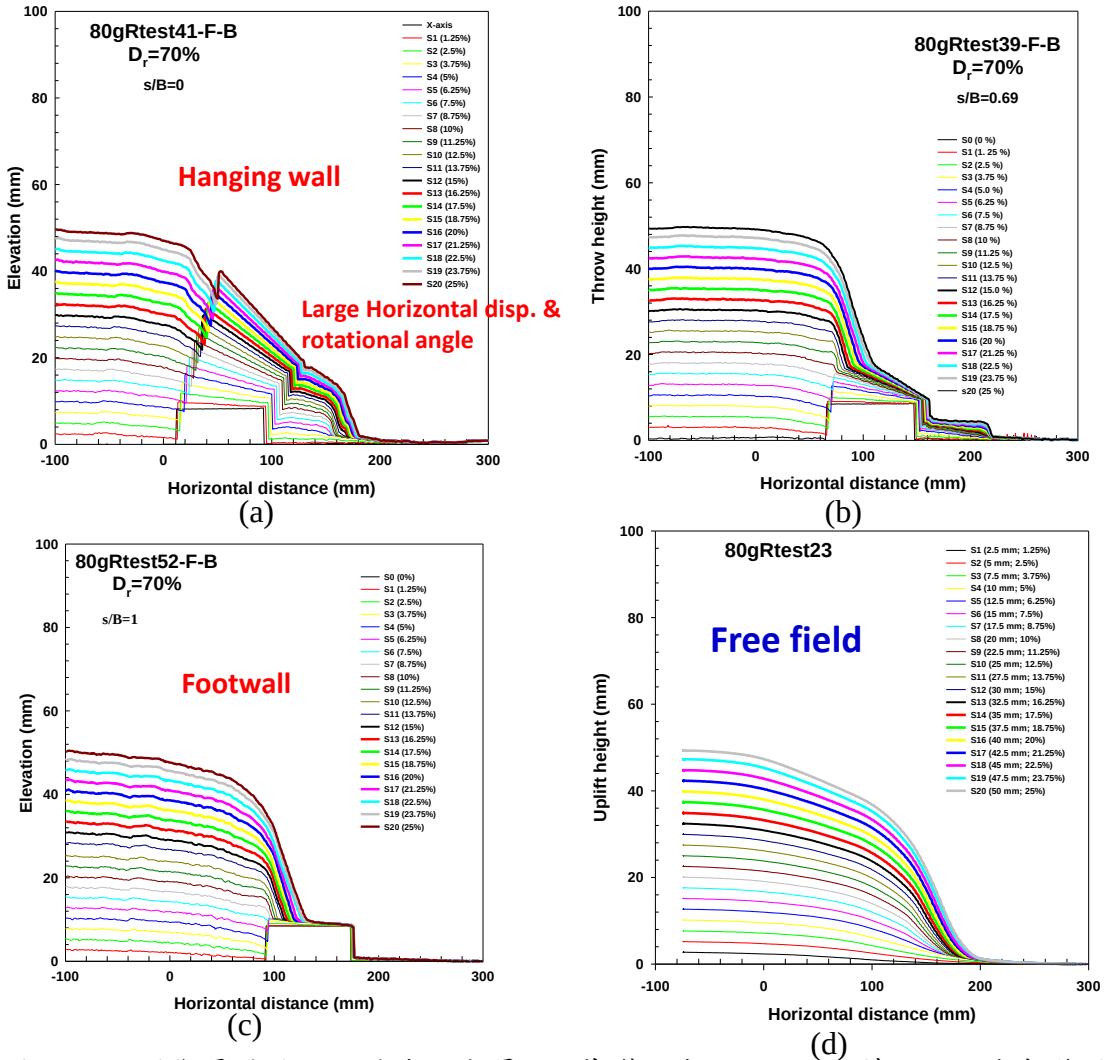
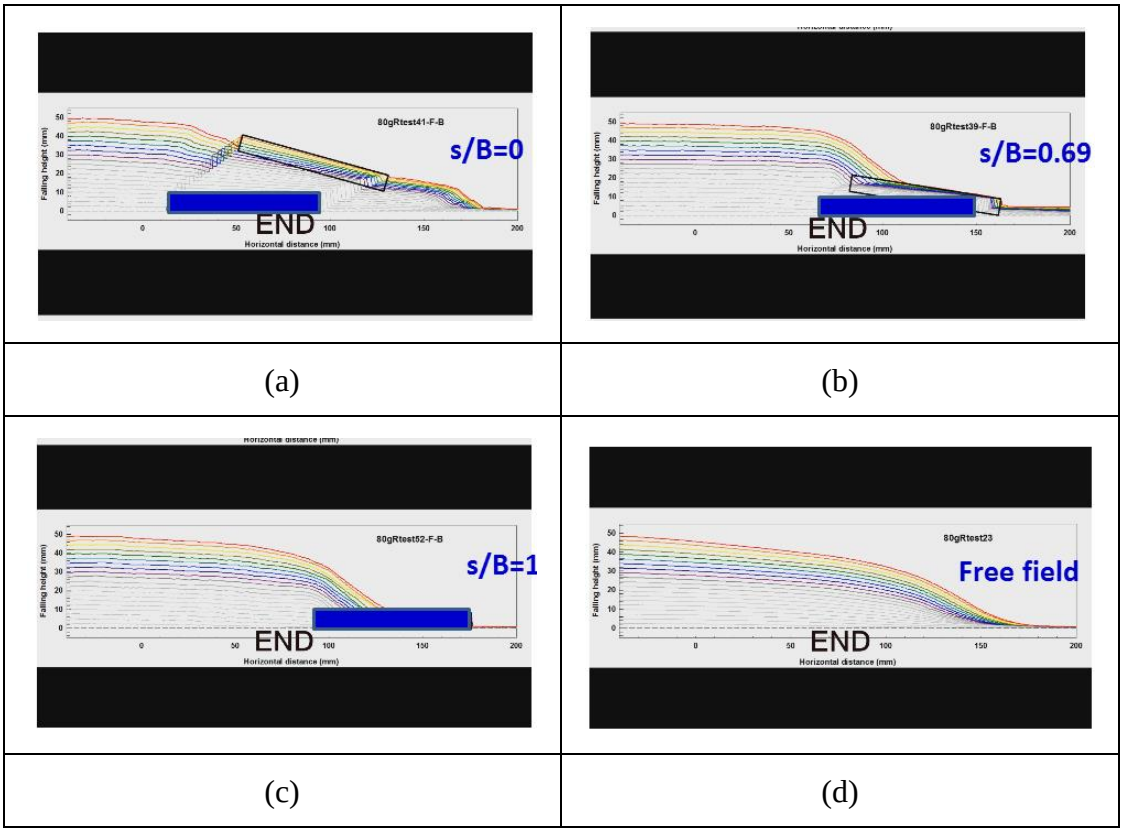


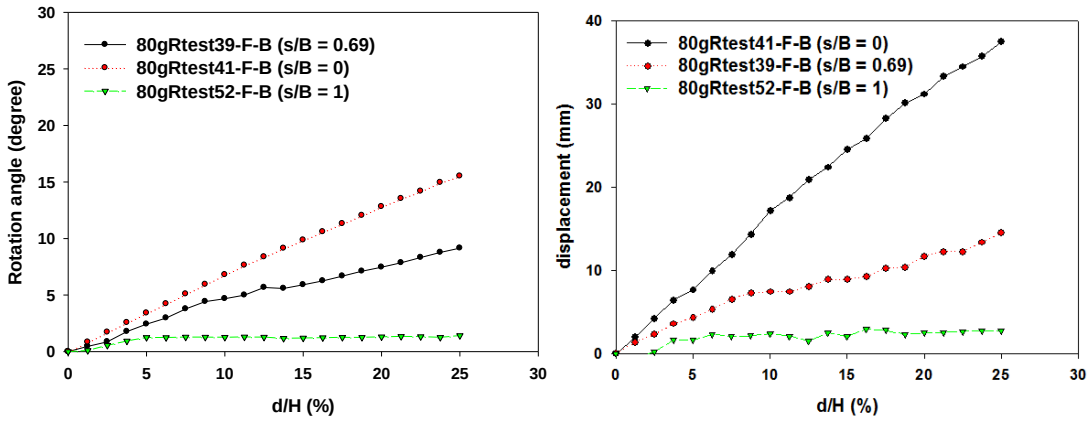
圖 6.2.39 逆斷層試驗不同垂直錯動量，B 基礎版在不同 s/B 的情況下，地表變形剖面之比較。(a)s/B=0；(b)s/B=0.69；(c) s/B=1；(d)自由場



(a) (b)

(c) (d)

圖 6.2.40 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



(a) (b)

圖 6.2.41 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，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 6.2.42 921 集集地震逆斷層錯動建物損壞情形(黃文正提供)

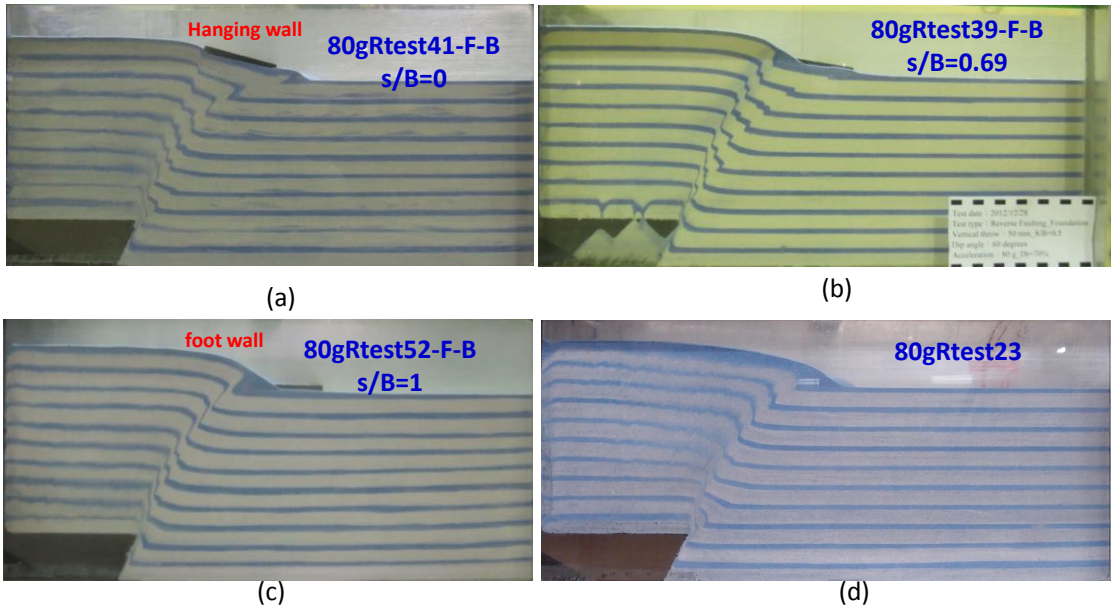


圖 6.2.43 逆斷層試驗，B 基礎版在不同 s/B 的情況下，淺基礎版對逆斷層出露地表位置及主破裂面範圍之影響比較。(a)s/B=0；(b)s/B=0.69；(c)s/B=1；(d)自由場

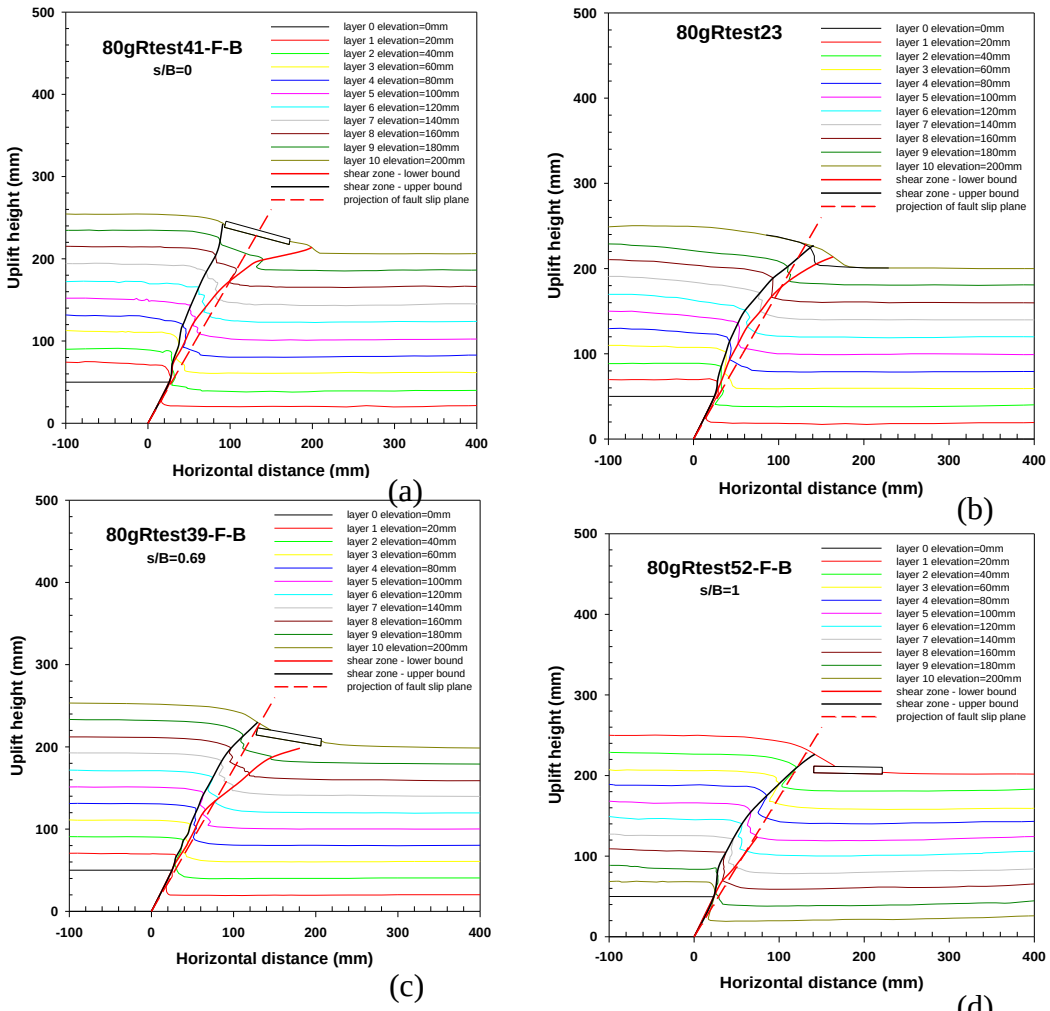


圖 6.2.44 逆斷層試驗，B 基礎版在不同 s/B 的情況下，淺基礎版對逆斷層跡出露地表位置及主破裂面範圍之比較。(a)s/B=0；(b)自由場；(c)s/B=0.69；(d) s/B=1

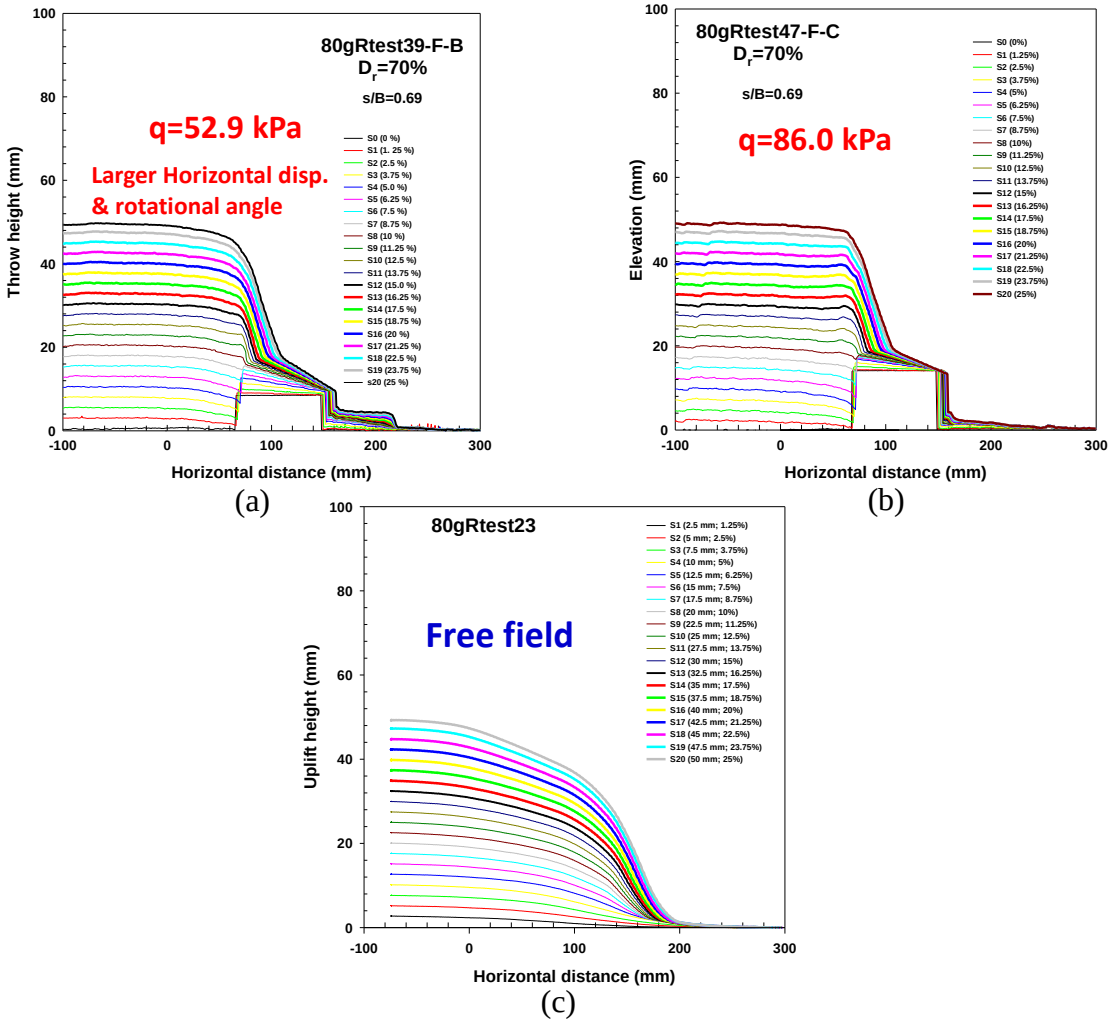


圖 6.2.45 逆斷層試驗不同垂直錯動量，不同載重基礎版在相同 s/B=0.69 的情況下，地表變形剖面之比較。(a)B 基礎(q=52.9kPa)；(b)C 基礎(q=86.0kPa)；(c)自由場

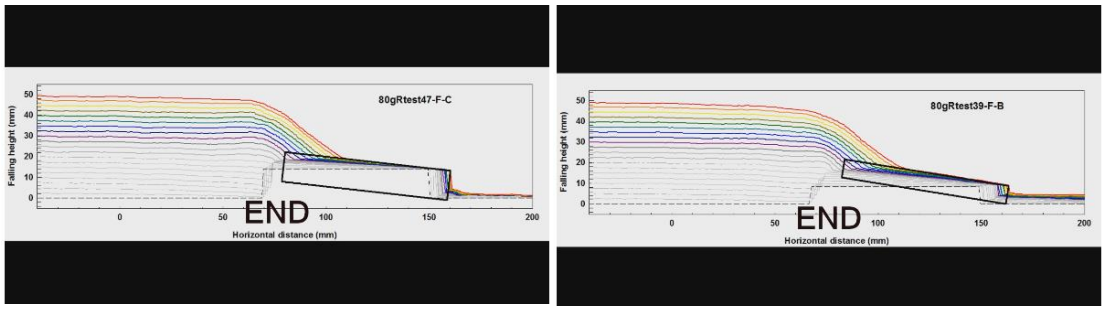
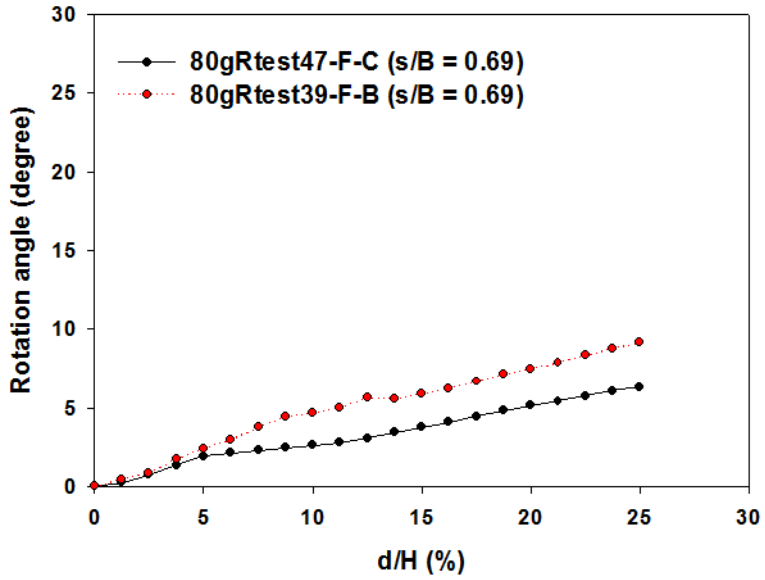
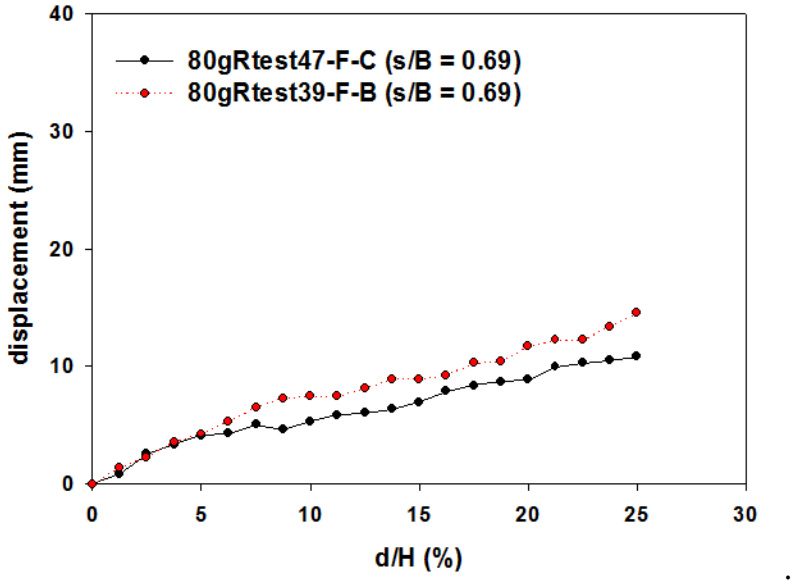


圖 6.2.46 逆斷層試驗不同垂直錯動量，不同載重基礎版在相同 s/B=0.69 的情況下，地表變形剖面之比較。(a)B 基礎(q=86.0kPa)；(b)C 基礎(q=52.9kPa)

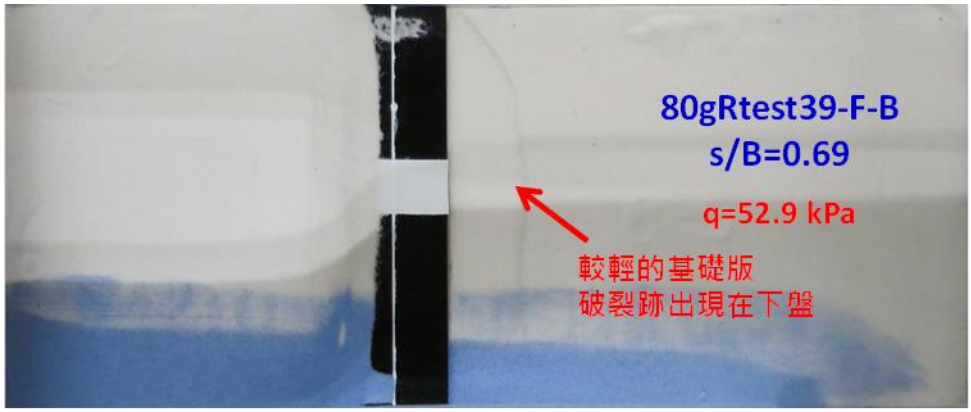


(a)



(b)

圖 6.2.47 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，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



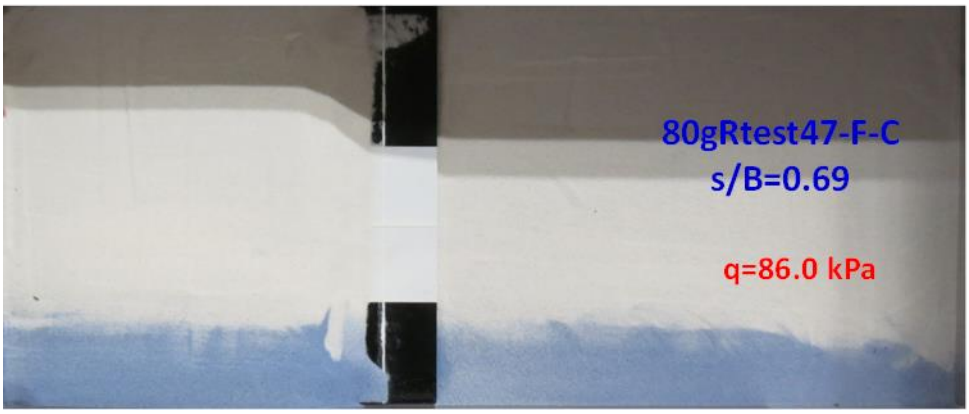


圖 6.2.48 逆斷層試驗垂直錯動量 r=25%時，不同載重基礎版在相同 s/B=0.69 的情況下，斷裂跡出露地表情形。(a)B 基礎(q=52.9kPa)；(b)C 基礎(q=86.0kPa)

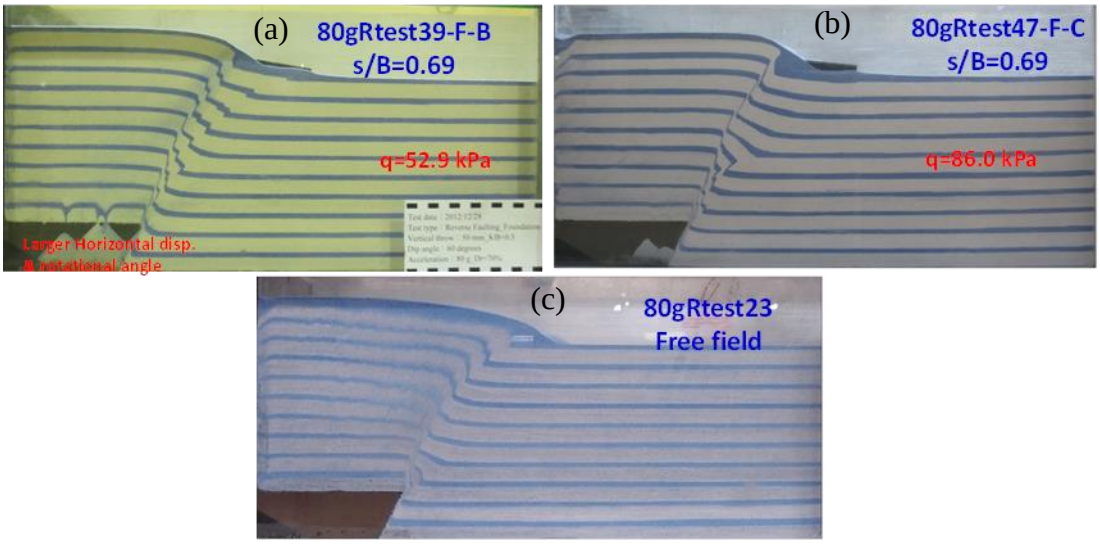


圖 6.2.49 逆斷層錯動試驗，在相同 s/B=0.69 的情況下，不同載重的淺基礎版對逆斷層跡出露地表位置及主破裂面範圍之比較。(a)q=52.9kPa；(b)q=86kPa；(c)自由場

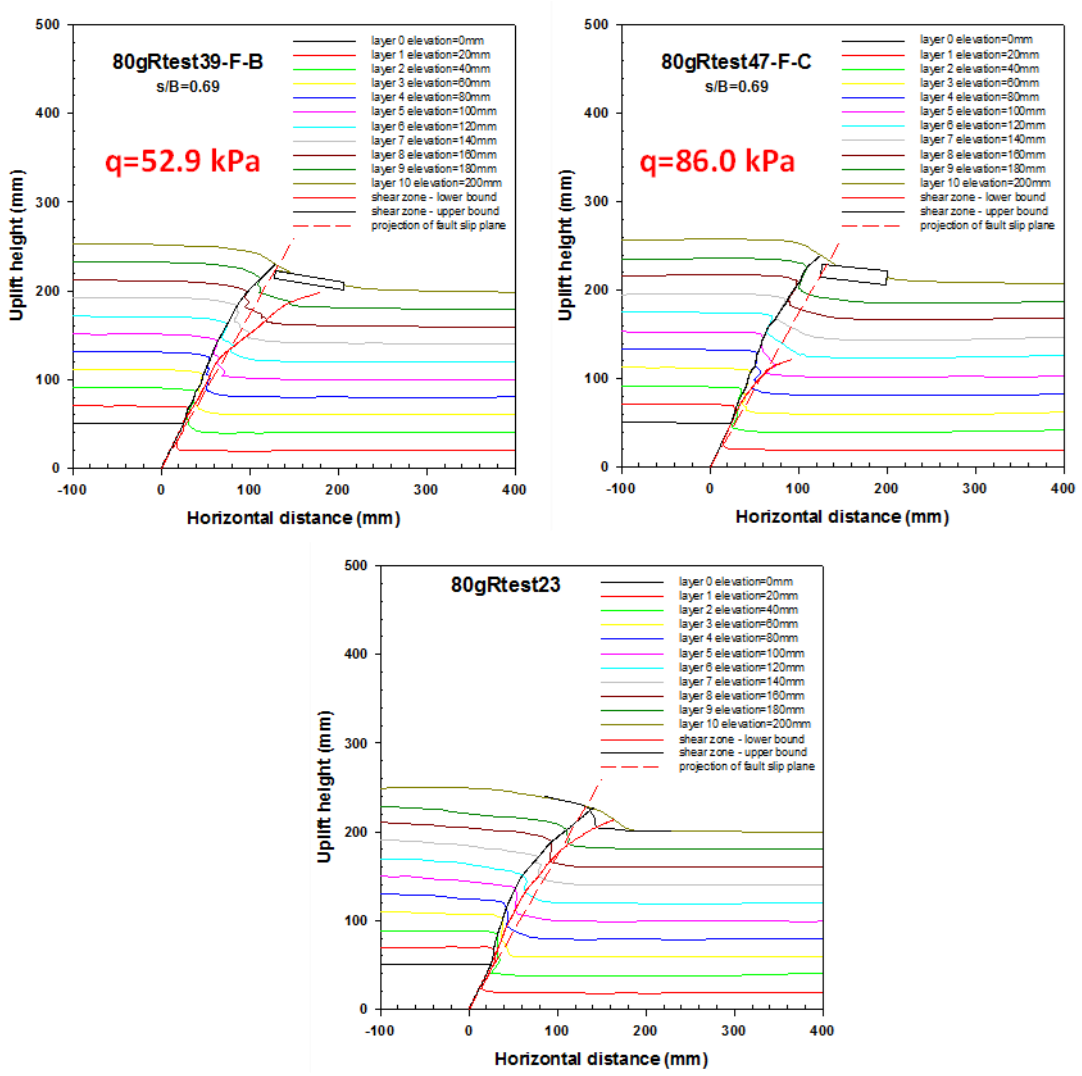


圖 6.2.50 逆斷層試驗，相同 s/B=0 的情況下，不同載重的淺基礎版對逆斷層跡出露地表位置及主破裂面範圍之比較。(a)q=52.9 kPa；(b)q=86.0 kPa；(c)自由場

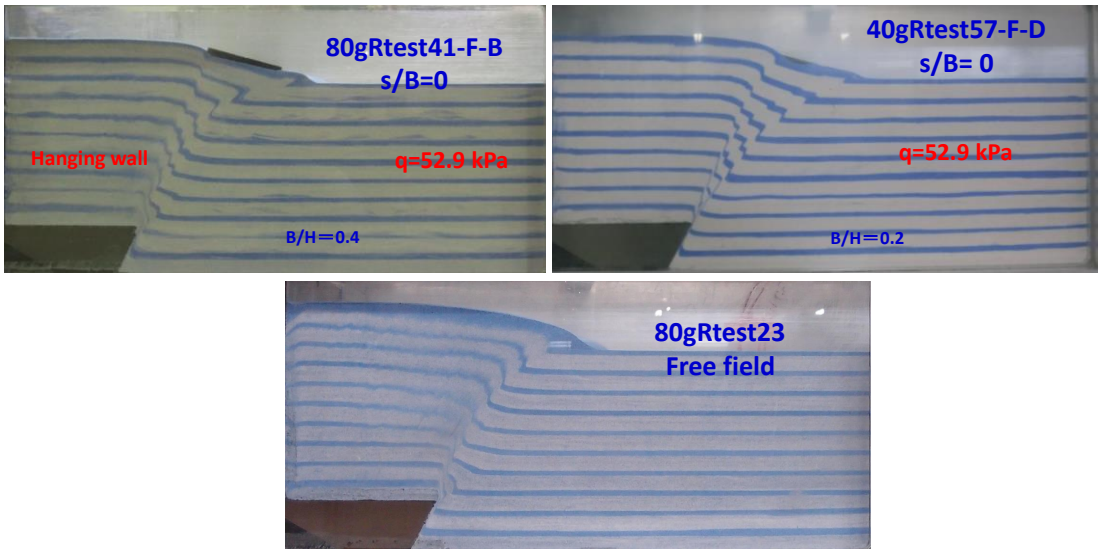


圖 6.2.51 逆斷層試驗，在相同 s/B=0 的情況下，不同寬度的淺基礎版對逆斷層跡出露地表位置及主破裂面範圍之比較。(a) 8.06 cm；(b) 4.03 cm；(c)自由場

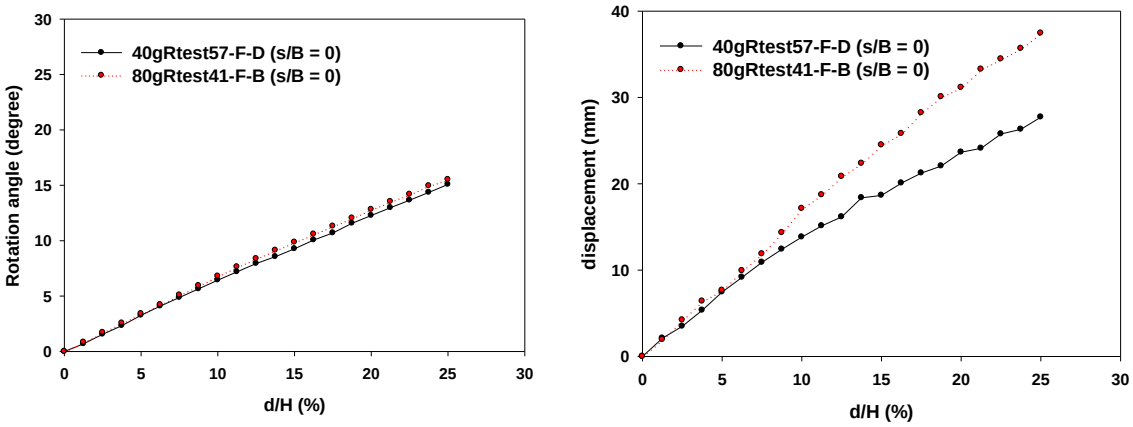


圖 6.2.52 逆斷層試驗，在相同 s/B=0 的情況下，不同寬度的淺基礎版旋轉角、水平位移之比較。(a)旋轉角；(b)水平位移

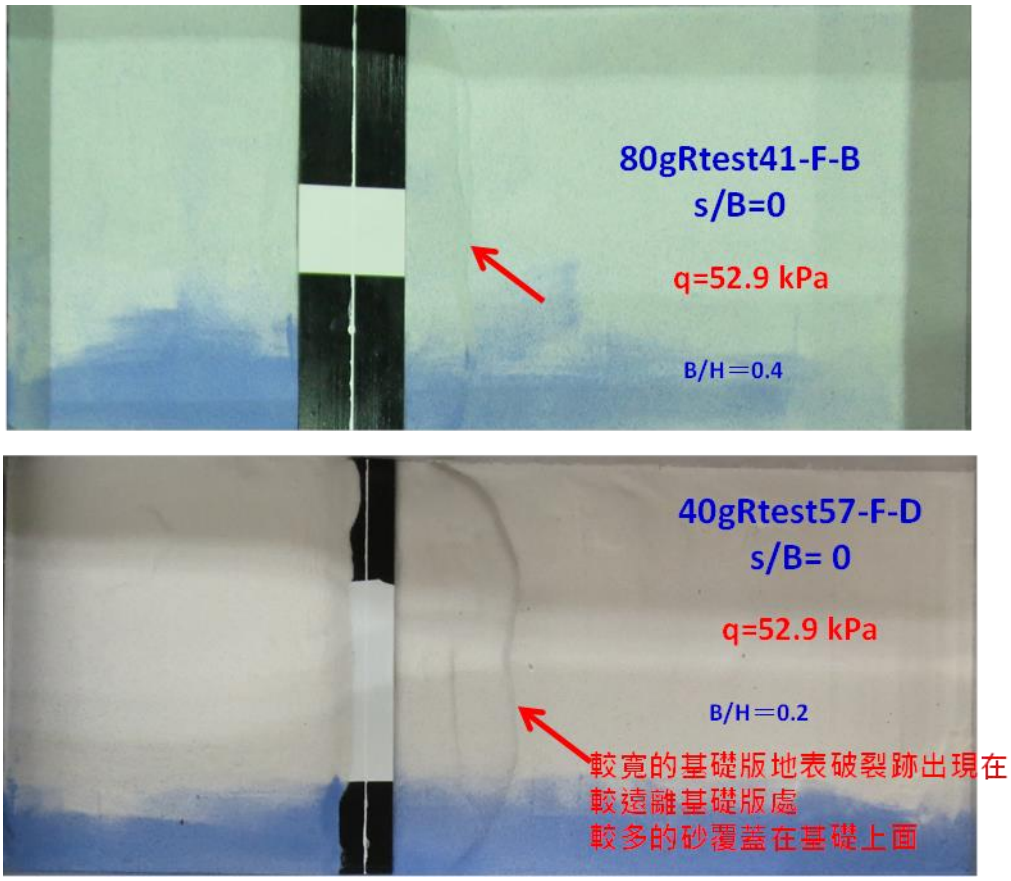


圖 6.2.53 逆斷層試驗，在相同 s/B=0 及相同載重的情況下，不同寬度的淺基礎版試驗後地表面斷層跡出露景象的比較

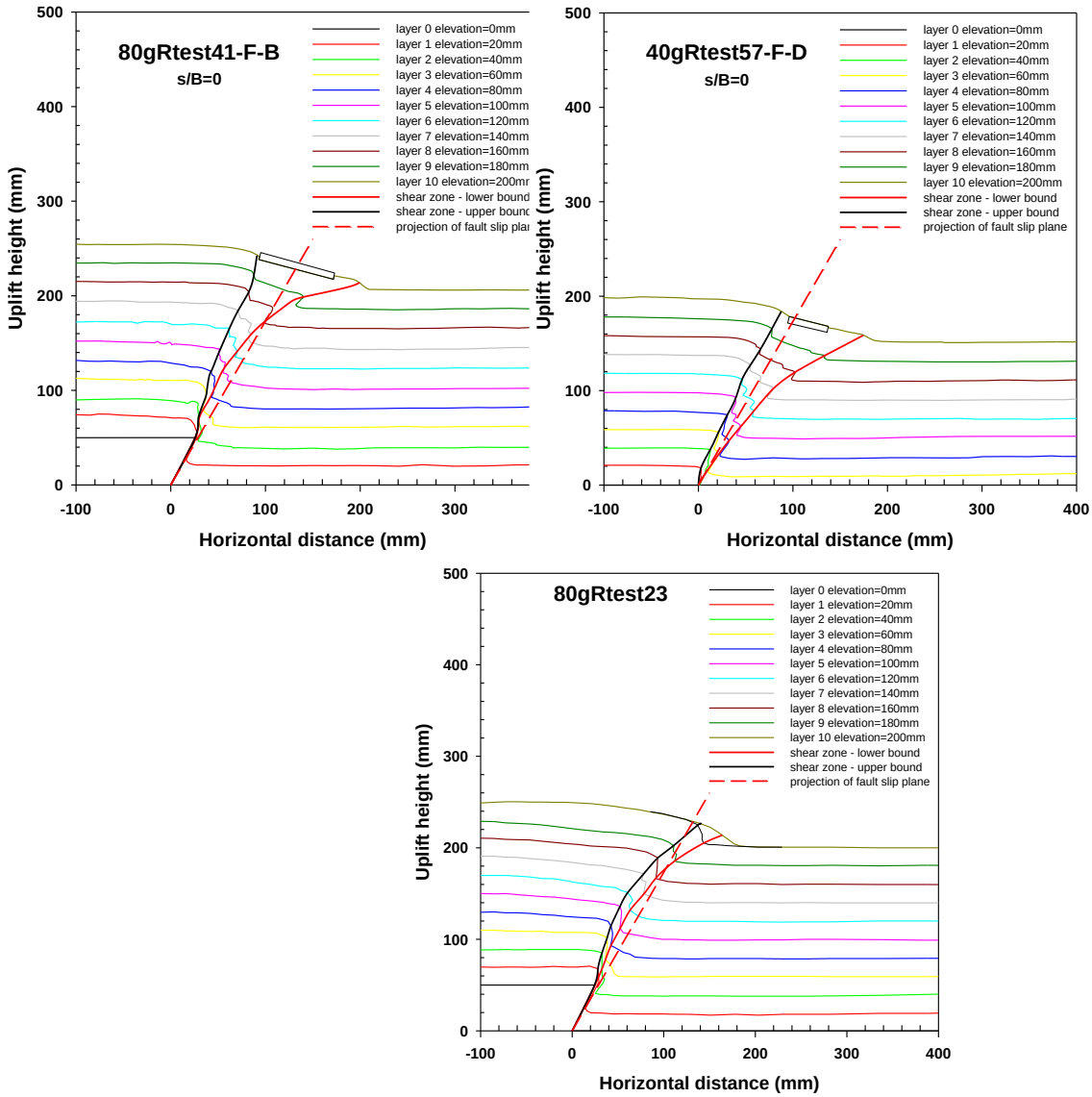
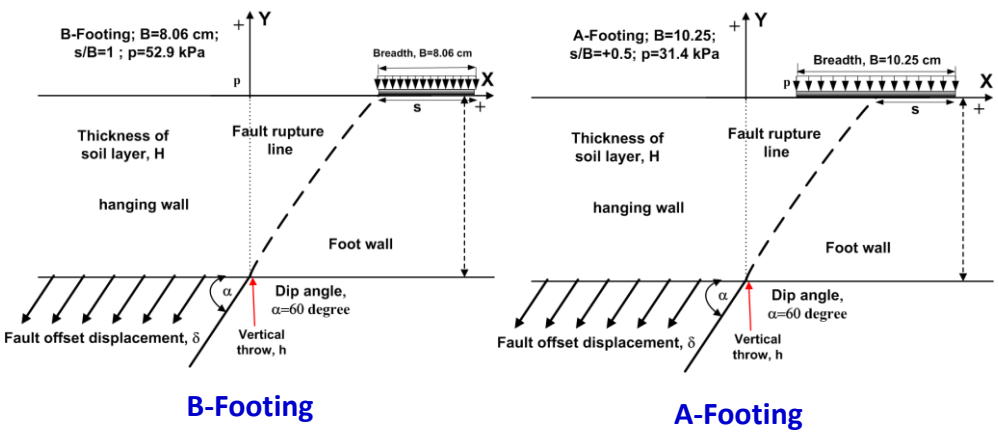


圖 6.2.54 逆斷層試驗，在相同 s/B=0 及相同載重的情況下，不同寬度的淺基礎版試驗後及自由場地下斷層跡出露景象的比較

6.3 剛性淺基礎版與正斷層的互制效應及對斷層跡發展的影響

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）、基礎版寬度(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 6.3.39 為本研究所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 6.3.40 為正斷層錯動試驗，在不同垂直錯動量，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 6.3.41 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=0，1 處，地表變形剖面之比較。圖 6.3.42、6.3.43 及圖 6.3.44 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 6.3.45 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 6.3.46 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 6.3.47 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。座落於上盤的淺基礎較座落於下盤的淺基礎有較大的旋轉角及水平位移，但基礎右側卻有較小的垂直變位。圖 6.3.48 為 B 型淺基礎座落與上盤會有較多的砂覆蓋在基礎上面。



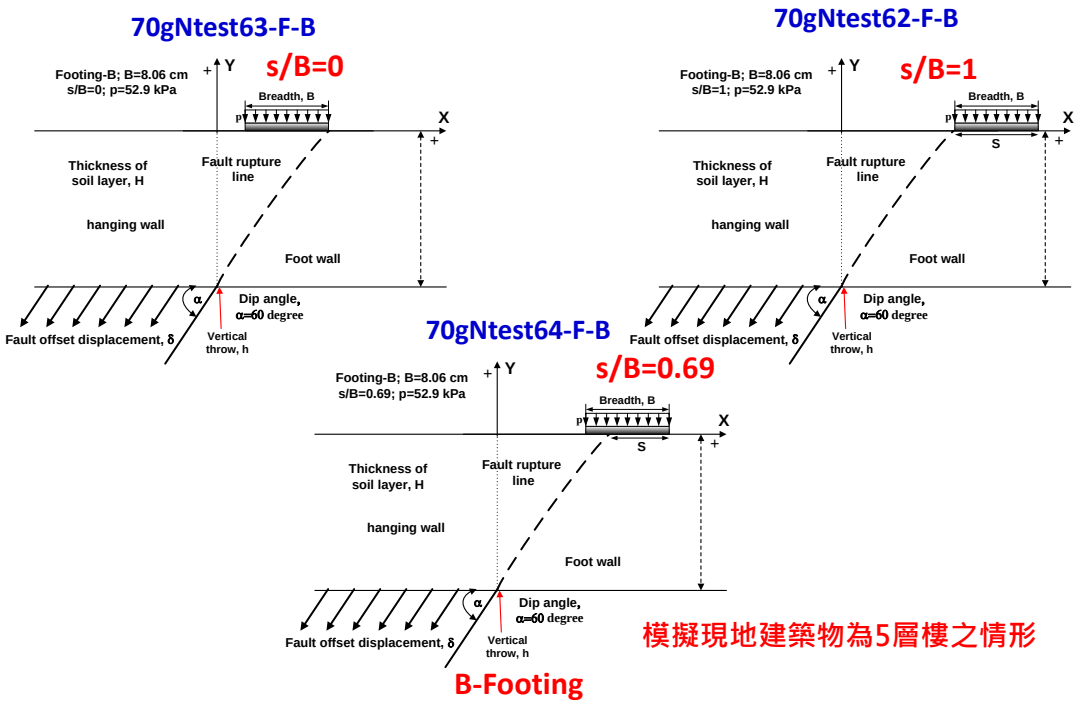


圖 6.3.39 本研究不同試驗，剛性淺基礎版與正斷層跡出露地表相對位置關係示意圖

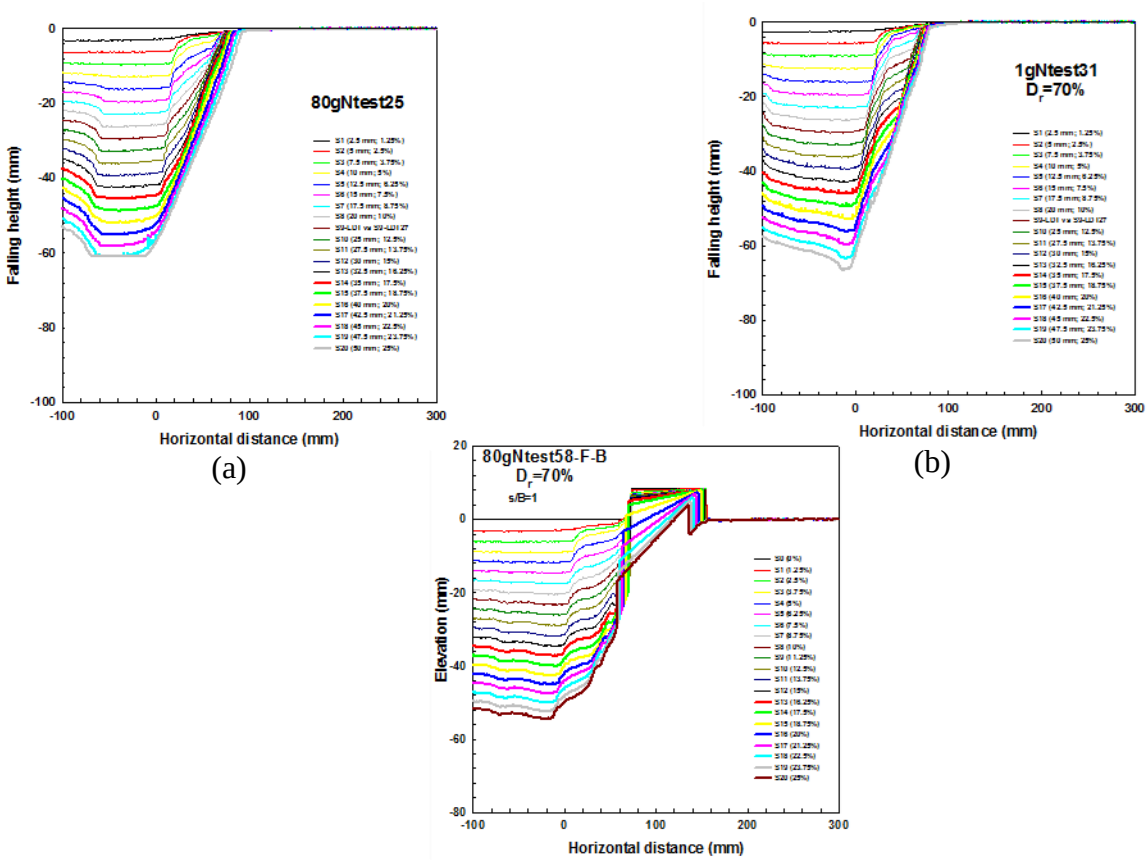


圖 6.3.40 正斷層錯動試驗不同垂直錯動量，自由場(1g 及 80g 情況下)及 B 基礎版在 s/B=1 的情況下，地表變形剖面之比較。(a)80g 自由場；(b)1g 自由場；(c) s/B=1

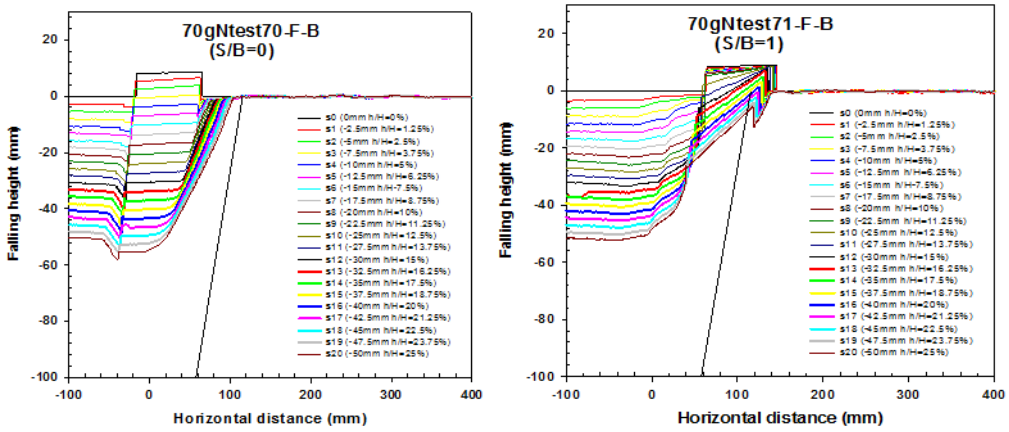
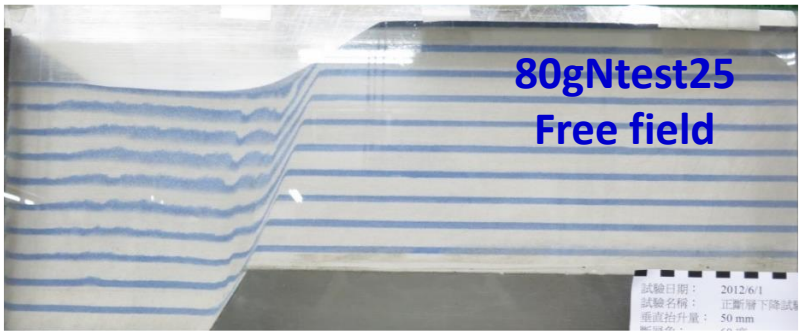
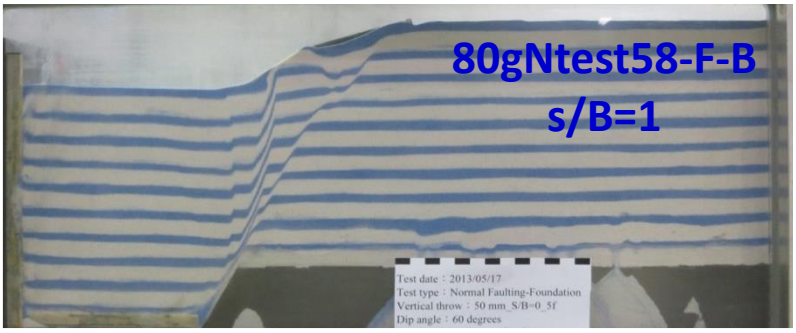


圖 6.3.41 正斷層錯動試驗不同垂直錯動量，B 基礎版在 s/B=0(70gNtesy70-F-B)及 s/B=1(70gNtest71-F-B)的情況下，地表變形剖面之比較

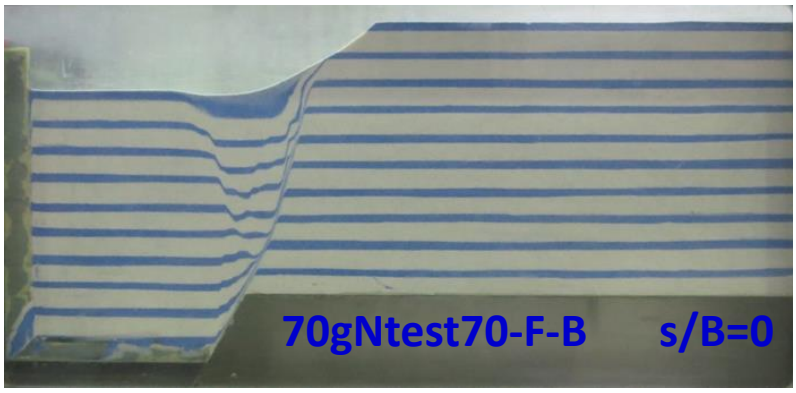


(a)



(b)

圖 6.3.42 正斷層(80g)垂直錯動量 5cm 後自由場及 B 基礎版座落於 s/B=1 處，地下破裂跡的比較。(a)自由場; (b)s/B=1

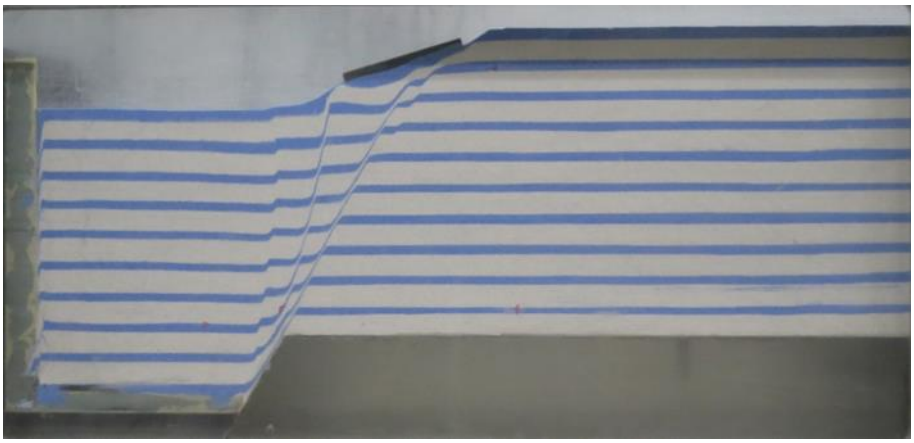


(a)s/B=0



(b)自由場

圖 6.3.43 正斷層(70g)錯動 5cm，B 基礎版座落於不同位置，地下破裂跡的比較。

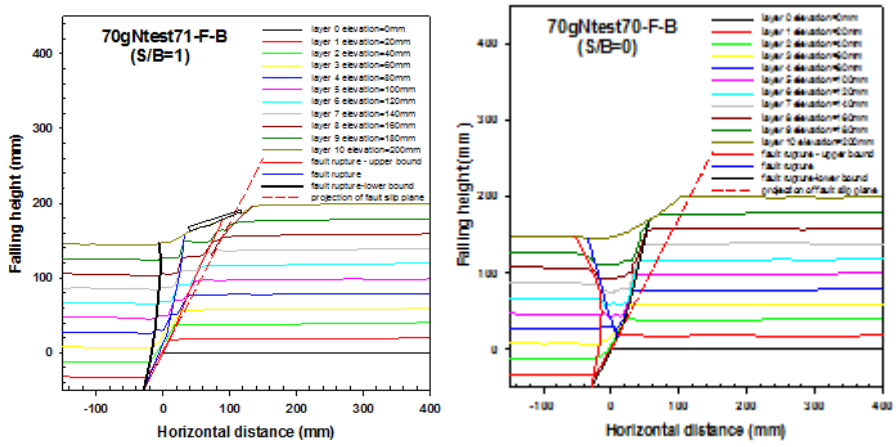


(a)70gNtest71-F-B，s/B=1



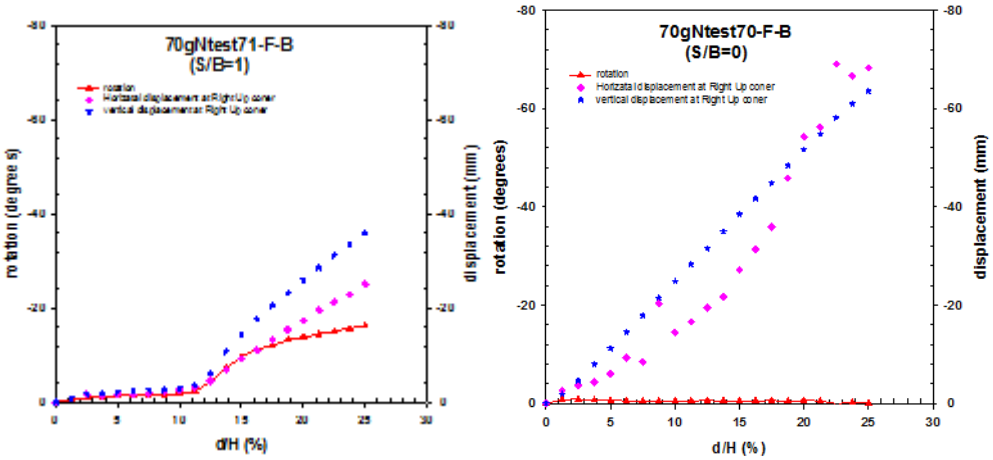
(b)70gNtest69，Free field

圖 6.3.44 正斷層(70g)錯動 5cm 後，B 基礎版座落於 s/B=1 之地下破裂跡



(a)s/B=1　　(b)s/B=0

圖 6.3.45 正斷層(70g)錯動 5cm 後，B 基礎位於 s/B=0 及 s/B=1，地下破裂跡比較



(a)s/B=1　　(b)s/B=0

圖 6.3.46 正斷層(70g)不同垂直錯動量下，B 基礎版位於 s/B=0 及 s/B=1 處，旋轉角水平位移及垂直位移之比較。

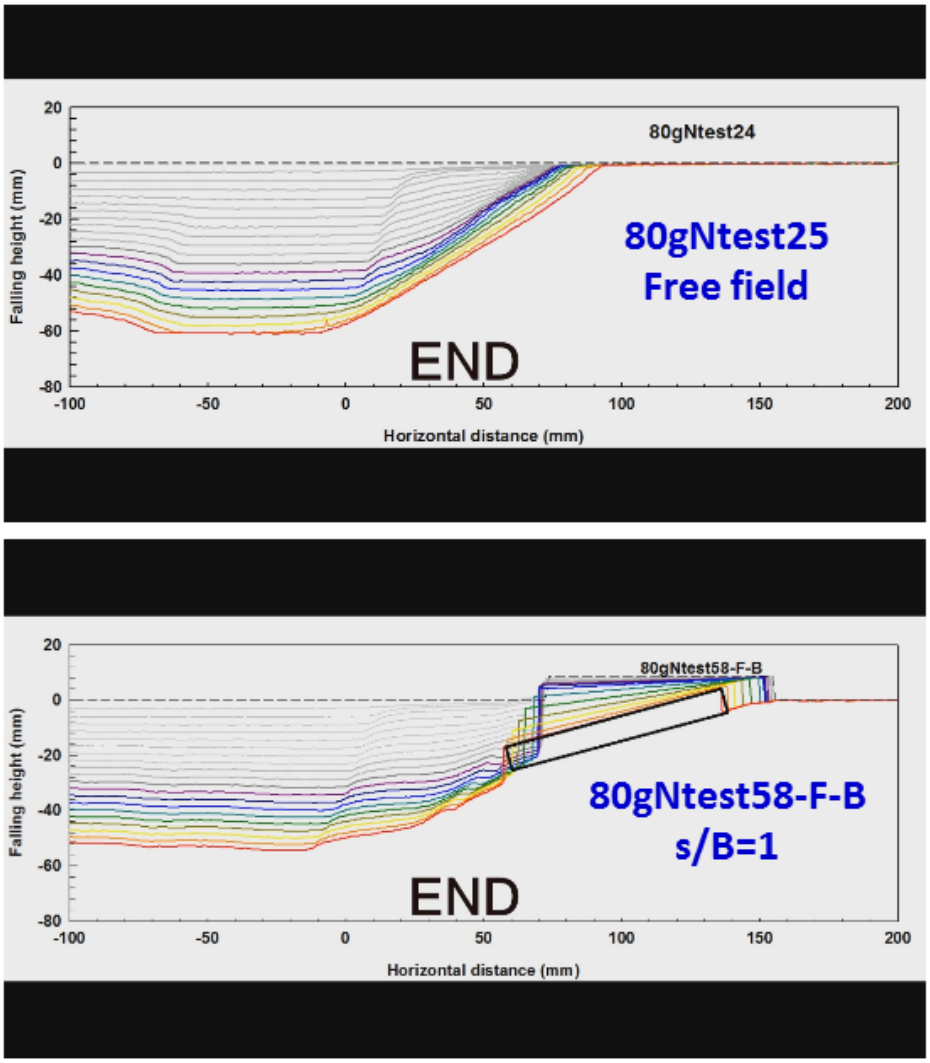


圖 6.3.47 正斷層在不同垂直錯動量，自由場及 B 基礎版座落於 s/B=1 處，地表變位剖面與基礎版傾斜及位移的情形地下破裂跡的比較

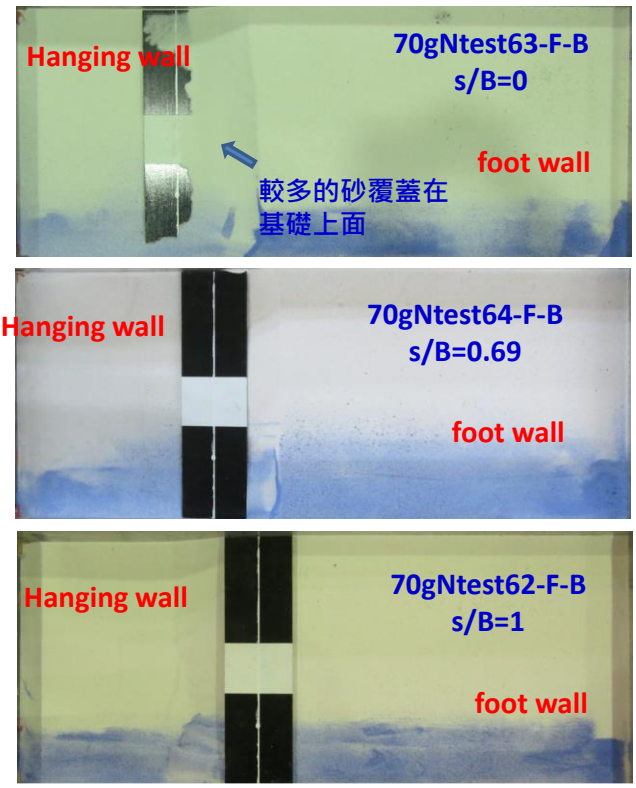


圖 6.3.48 B 型淺基礎座落位置對正斷層錯動地表變位剖面的影響

6.4 機率式斷層位移危害度分析(PFDHA)

由於近年來鄰近斷層重大設施之可靠度受到社會大眾極高的重視，Youngs et al (2003)針對美國核廢料儲存場址 Yucca Mountain 相對於斷層所在位置，提出評估斷層錯動下位移量超越機率之方法，以探討某場址在使用年限下之結構安全性，此一方法稱為機率式斷層位移危害度分析(PFDHA, Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis)，乃用來描述某位置受某(些)斷層影響下之位移量超越機率，此一分析法，主要可分為地震法與位移法，地震法源自於機率式地震危害度分析(PSHA, Probabilistic Seismic Hazard Analysis)，參照 PSHA 之理論公式，需要以下各條件機率，以進行機率式斷層位移危害度分析，其中大多與斷層類型有關(正斷層、逆斷層或平移斷層)，分別為(1) 斷層發生某地震矩規模之平均以及其標準差，可利用來模擬其地震規模之分佈情形，本計畫採取之分佈類型為對數常態分佈；(2) 斷層錯動造成地表破裂的機率，一般與地震矩規模有關；(3) 主斷層長度、迴歸年以及其錯移速率；(4) 沿主斷層線之破裂位置及其對應之位移

量統計資料，此一部分與斷層類型有密切關係，本計畫中蒐集了三大主要類型之斷層文獻，可供使用，其中沿主斷層線不同破裂位置與其對應之位移量，一般亦會對其最大或平均位移量進行正規化後，再進行統計分析；(5) 若要進行遠離主斷層線之位移衰減評估，則僅需針對第 4 項所述之機率進行分析，遠離主斷層位移衰減式亦與斷層類型有關，需視相關資料量之足夠與否才能進行危害度分析。考慮某一斷層錯動且造成地表破裂之機率，以及該斷層線上某位置產生大於給定位移量之機率一併考慮，以下式表示：

$$P_{kn}(D>d\,|\,m,r)=P_{kn}(\text{Slip}\,|\,m,r)\cdot P_{kn}(D>d\,|\,m,r,\text{slip}) \qquad \text{式 6.1.10}$$

上式左側代表震源 n 對場址 k(位於主斷層線上距離端點為 r 處)在規模 m 影響下，場址 k 發生位移量 D 大於某特定位移量 d 之機率，可由上式右側計算而得，上式右側第一部分代表在上述條件下，場址 k 發生主斷層滑移的機率，而上式右側第二部分則在滑移條件下，發生上述狀況之條件機率。

斷層錯動造成地表發生滑移或破裂之機率，一般認為與地震矩規模有關，Wells & Coppersmith(1994)年利用全世界蒐集而得之各類斷層(正、逆、平移斷層整合)資料提出下式，用以評估主斷層發生破裂之機率，Youngs et al (2003)亦將 Pezzopane & Dawson(1996)所蒐集正斷層破裂資料與其相對應之地震規模(m)繪圖並進行迴歸，其對應之參數依照不同資料庫而有不同之建議值，如表 6.1.7 所示：

$$P(\text{principal surface rupture})=\frac{e^{a+bm}}{1+e^{a+bm}} \qquad \text{式 6.1.11}$$

此外，在斷層錯動造成地表破裂的條件下，沿主斷層線上某位置之位移量亦需仰賴斷層錯動與位移量之資料庫進行分析，Wheeler(1989)利用美國西部麓山帶五次正斷層錯動事件，以及 McCalpin(1998)利用 11 次正斷層錯動事件，整理沿主斷層線上不同位置(距離斷層端點 x 處)與主斷層長度(L)下，其對應之位移量(D)，並以該主斷層線最大位移量(MD)或平均位移量(AD)進行正規化，找出沿主斷層線上之正規化位移量分佈情形，並以如 Beta 分佈，Gamma 分佈描述其位移沿斷層線不同位置分佈情形，如此一來，即可利用地震法進行危害度分析。上述中關

於最大位移量(MD)或平均位移量(AD)的推估部分，一般以經驗公式推估，較常引用的研究結果為 Wells & Coppersmith(1994)年提出之經驗公式，其與地震規模、斷層錯動造成地表破壞長度有關，其常見之經驗公式如表 6.1.8 所示。由於各不同經驗公式適用不同性質之斷層，在選擇對應之參數上需多加注意，另外，某些經驗公式之相關係數(correlation coefficient)相當低，代表使用該經驗公式所得物理量之誤差可能極大，需特別小心。

PFDHA 中的位移法相關分析資料主要需靠現場斷層挖溝資料中獲得，如滑移事件之平均年發生速率(λDE)，一旦取得平均年發生速率，即可利用類似地震法理論求得超過某特別位移量之年發生平均次數，如下式所示：

$$\nu(d) = \lambda_{DE} \cdot P(D > d \mid Slip) \qquad \text{式 6.1.12}$$

其中 v(d)為超過某指定位移量 d 之年發生次數，滑移事件平均年發生速率(λDE)之推估可依斷層挖溝資料定年取得，即可求得某時間區間內發生地震事件次數以及其對應之錯動量；另外，滑移事件速率亦可以利用斷層滑移速率(Slip Rate)以及平均滑移量求得，平均滑移量可由挖溝資料或經驗公式求得。

由於上述各資料或經驗公式推估大多針對正斷層分析，若要進行其他類型斷層之危害度分析，則較不適用，因此，Moss & Ross(2011)亦針對逆斷層進行統計分析，並將逆斷層錯動造成地表破裂機率進行資料更新，其中包括 1999 年發生於台灣集集之車籠埔斷層錯動事件，由於正逆斷層造成地表破裂機制不同，Moss & Ross(2011)建議下式，用以評估逆斷層在給定地震矩規模(m)下錯動，造成地表破裂機率：

$$P(\text{principal surface rupture}) = \frac{1}{1+e^{7.30-1.03m}} \qquad \text{式 6.1.13}$$

此外，由於逆斷層之主要斷層線上不同位置之位移量均與正斷層分佈情形不同，上述研究亦針對所蒐集之資料庫進行統計分析，發現位移量(D)與平均位移量(AD)正規化後，可以 Weibull 分佈或 Gamma 分佈描述其分佈情形，若位移量與平均位移量正規化(z=D/AD)，則 z 的分佈可以 Beta 分佈描述，如下式所示：

$$f(z)=\frac{k}{\lambda}(\frac{z}{\lambda})^{k-1}e^{-(z/\lambda)^k}$$

$$k=\exp[-31.8(\frac{x}{L})^3+21.5(\frac{x}{L})^2-3.32(\frac{x}{L})+0.431]$$

$$\lambda=\exp[17.2(\frac{x}{L})^3-12.8(\frac{x}{L})^2+3.99(\frac{x}{L})-0.38]$$

式 6.1.14

此外，位移量與平均位移量正規化(z=D/AD)，之分佈亦可以用 Gamma 分佈描述，如下式所示：

$$f(z)=z^{k-1}\frac{e^{-(z/\theta)}}{\theta^k\Gamma(k)}$$

$$k=\exp[-30.4(\frac{x}{L})^3+19.9(\frac{x}{L})^2-2.29(\frac{x}{L})+0.574]$$

$$\theta=\exp[50.3(\frac{x}{L})^3-34.6(\frac{x}{L})^2+6.60(\frac{x}{L})-1.05]$$

式 6.1.15

如同前述，由於 Wells 與 Coppersmith 所提出部分經驗公式推估平均位移量或最大位移量相關係數較低，且所使用資料庫並無法包含近期發生之逆斷層錯動事件，因此上述研究亦針對平均位移量或最大位移量之推估進行探討，並將如台灣集集地震(1999)以及中國汶川地震(2009)等八個逆斷層錯動事件列入資料庫內進行分析，提出評估之經驗公式(AD，MD 單位均為公尺，m 為地震矩規模)如下：

$$\log(AD)=0.3244m-2.2192,\sigma=0.17,R^2=0.62$$

式 6.1.16

$$\log(MD)=0.5102m-3.1971,\sigma=0.31,R^2=0.53$$

式 6.1.17

針對正斷層以及逆斷層之位移危害度分析，即可利用上述方法進行探討，並依不同斷層破裂長度，滑移速率以及迴歸年等，定出危害度曲線，以滿足工程設計所需。

此外，Petersen et al. (2011)亦針對平移斷層(strike-slip fault)之機率式斷層位移危害度分析進行討論，針對主斷層線以及次要破裂帶(遠離主斷層線)上之位移進行歷史資料之統計及分析，研究中主要蒐集之平移斷層共有 22 條，其中亦包含 Wesnousky(2008)蒐集之 13 條平移斷層。為驗證 Wells & Coppersmith(1994)所提平移斷層關於地震矩規模與平均位移關係之經驗公式，Petersen et al. (2011)亦將研究中所蒐集之資料點與經驗公式一併標示於圖中，如圖 6.1.38 所示，可以得知 Well & Coppersmith(1994)所提之經驗公式亦有效涵蓋此次研究之資料點。

Petersen et al. (2011)將平移斷層上沿主斷層不同位置之位移量亦進行整理，如圖 6.1.39 所示，研究中不同位置(l/L)之位移量(D)分別以雙線式(bilinear)、多項式(Quadratic)以及橢圓式(Elliptic function)進行擬合，並以其對應之地震規模為變數之一進行迴歸，研究中建議之經驗公式以及其標準差如下式所示，其中 m 為地震矩規模，D 為主斷層線之位移，單位為公分：

雙線式(bilinear)：

$$\frac{x}{L}<0.3,\ln(D)=1.797m+8.52.(\frac{x}{L})-10.28 \quad , \qquad \text{式 6.1.18}$$

標準差為 1.29(取自然對數後之值)

$$\frac{x}{L}>0.3,\ln(D)=1.7658m-7.8962 \quad , \qquad \text{式 6.1.19}$$

標準差為 0.9624(自然對數)

多項式(quadratic)

$$\ln(D)=1.7895m+14.47(\frac{x}{L})-20.17(\frac{x}{L})^2-10.545 \quad , \qquad \text{式 6.1.20}$$

標準差為 1.1346(自然對數)

橢圓式(Elliptical function)

$$\ln(D)=3.3\sqrt{1-\frac{1}{0.25}[(l/L)-0.5]^2}+1.793m-11.22 \quad , \qquad \text{式 6.1.21}$$

標準差為 1.1348(自然對數)

另外，Petersen 亦建議可用正規化位移量求取平移斷層主斷層線上之位移量，以(D/Dave)表示，由於平均位移量(Dave)已使用地震矩規模(m)搭配 Wells 與 Coppersmith 建議之經驗公式推估，因此研究中建議之經驗公式僅與沿主斷層線上之位置(l/L)有關，由於 Wells 與 Coppersmith 建議之平均位移與經驗公式具有不確定性，因此 Petersen 建議使用上述位移量與地震矩規模及位置之經驗公式，其對應之不確定性較少。

上述討論之位移量均著重於主斷層線上之值，正斷層、逆斷層以及平移斷層均有其對應之資料庫及據以推估而得之經驗公式，然而，當欲計算位移之位置遠離主斷層線(off-fault displacement 或 distributed fault displacement)，一般認知上主

斷層線上之位移量大多大於遠離斷層線之位移，且隨距離愈大其對應之位移量愈小，對應之位移數量級(order)亦不同，沿主斷層線上之位移量常用公尺為其單位，而遠離斷層線之位移則常以公分計，但由 Petersen et al. (2011)針對平移斷層所蒐集之資料指出，當遠離主斷層線 12 公里處，可能還會有 35 公分位移量之影響，如圖 6.1.40 所示。

針對遠離主斷層線之位移量，Youngs et al. (2003)亦利用類似上述主斷層線之位移推估方法進行計算，但由於遠離主斷層線之破裂機率不易定義，Youngs et al. (2003)先將各正斷層對應之地表破裂描繪並數位化，再以 500m 為邊長之網格進行套疊，之後計算佔有次要斷層(distributed faults)之網格數(同時記錄其距離主斷層線之發生位置)，並以地震影響區之總網格數進行比例之計算。研究中以 Pezzopane & Dawson(1996)蒐集之正斷層資料，分別對各正斷層之上盤以及下盤進行主斷層線錯動造成遠離主斷層線破裂之機率探討，如圖 6.1.40 所示。

由圖 6.1.41 可以得知，地震矩規模愈大，會造成遠離主斷層線破裂之比例也愈高，此外，正斷層上盤位置之破裂機率亦較下盤處之破裂機率高，且其發生地表破裂之位置可能延伸至主斷層線外 15 公里處。上圖中亦針對正斷層在不同地震矩規模下遠離主斷層線之距離與其對應之破裂機率進行迴歸分析，其公式如下，其中 r 為距主斷層線之距離，單位為公里，m 為地震矩規模，h 為 1 代表正斷層之上盤，h 為 0 代表正斷層之下盤，zi 為隨機變數，其對應之平均值為零，標準差為 1。

$$P(\text{distributed surface rupture}) = \frac{e^{f(x)}}{1+e^{f(x)}} \qquad \text{式 6.1.22}$$

其中，$f(x) = 3.27 + (-8.28 + 0.577m + 0.629h).\ln(r + 4.14) + 0.611z_i$

由於次要斷層破裂之位移量資料相當少，因此對於本部分，僅能仰賴少量資料進行迴歸分析，對於正斷層而言，其正規化位移與距離以及上/下盤位置之資料標於圖 6.1.42，其中上盤資料相較於下盤資料稍多，下盤僅有一個資料點。圖 6.1.42 中，Youngs 等人(2003)針對該兩線段進行迴歸，並得到正規化後位移量與距離(單位為公里)關係如下式所示，圖中假設實線部分代表統計上 85~95%累積

機率線。由於對於正斷層而言資料量過少，因此上述討論中，針對各不同位置下之次要斷層之正規化位移量，可假設一個統計上較為合理之分佈(如 Gamma Distribution)進行後續斷層位移危害度分析。

此外，關於平移斷層遠離斷層線之位移及超越機率推估方面，Petersen et al (2011)亦針對所蒐集之 22 條平移斷層進行整理，並比照沿主斷層線之位移推估方法進行經驗公式之推導，其資料整理如圖 6.1.43 所示。

$$D_{distributed\,(hangingwall)} / MD_{(principalfault)} = 0.35e^{-0.091r}$$
$$D_{distributed\,(footwall)} / MD_{(principalfault)} = 0.16e^{-0.137r} \qquad \text{式 6.1.23}$$

根據上圖之資料，Petersen 建議如下之經驗公式計算遠離斷層線之位移量，其中 d、r 之單位分別為公分以及公尺，m 為地震矩規模。

$$\ln(d) = 1.4016m - 0.1671.\ln(r) - 6.7991 \text{ ，} \qquad \text{式 6.1.24}$$

標準差為 1.1193(取自然對數後之值)

由於 Youngs et al (2003)建議遠離斷層破裂機率之計算乃採 500m 邊長之網格進行破裂比例之計算，其解析度較低，因此 Petersen 等人在研究中採用邊長 200m 及 25m 之網格進行計算遠離平移斷層之破裂機率與距離及地震規模之關係，如圖 2.1.44 所示，可以得知，當網格邊長愈大時，其對應之破裂機率(P)會愈大，其經驗公式與使用之網格大小、斷層距離有關，如下式所示：

$$\ln(P) = a(z)\ln(r) + b(z) \text{ ，} \qquad \text{式 6.1.25}$$

其中 a(z)與 b(z)與所採用之網格尺寸有關，其對應之參數值詳見表 2.1.9 此外，r 為遠離斷層之距離，其單位為公里。

由於上述經驗公式所使用之資料主要集中在距離主斷層線約五百公尺外之資料點，但距主斷層線較近之範圍內(200 到 400 公尺內)，若要以上式進行外插，則所得之破裂機率可信度可能較低，因此研究中亦針對近域之破裂機率建議使用內插方式，以表 2.1.10 建議之距離以及相對應之破裂機率進行線性內插即可。

對於遠離逆斷層之位移量以及破裂機率等資料，就目前蒐集文獻而言，尚未有相關資料討論其計算方式，但其分析方法應可以上述步驟進行計算，以得到遠離斷層線之位移以及其破裂機率。

綜合上述，機率式斷層危害度分析可用地震法以及位移法進行主斷層以及遠離主斷層之可能位移量評估。地震法主要仰賴各不同性質斷層(正斷層、逆斷層或平移斷層)之經驗公式，以評估在某可能地震規模下，發生地表破裂之機率，並找出沿主斷層線或遠離主斷層線不同位置對應之位移超越機率，以對於某場址之可能位移量進行評估。位移法主要利用斷層挖溝或是歷史資料定年之方式找出該地點之事件滑移速率以及事件平均位移量，對於位移超越機率部分，則可考慮使用正規化位移量搭配統計上較常用之分佈曲線(如 Gamma 分佈)，以進行後續計算。

表 6.1.7 斷層破裂機率與地震規模關係參數表(Youngs 等人，2003)

Data Set	*a*	*b*
Data from Pezzopane and Dawson (1996)		
32 Great Basin earthquakes	−16.02	2.685
47 northern Basin & Range earthquakes	−18.71	3.041
105 extensional cordillera earthquakes	−12.53	1.921
Data from Wells and Coppersmith (1993)		
276 worldwide earthquakes	−12.51	2.053

表 6.1.8 平均位移(AD)及最大位移(MD)與地震規模(M)關係(Wells 與 Coppersmith，1994)

Table 2B
Regressions of Displacement and Moment Magnitude (M)

Equation*	Slip Type†	Number of Events	Coefficients and Standard Errors *a*(sa)	*b*(sb)	Standard Deviation *s*	Correlation Coefficient *r*	Magnitude Range	Displacement Range (km)
M = *a* + *b* * log (MD)	SS	43	6.81(0.05)	0.78(0.06)	0.29	0.90	5.6 to 8.1	0.01 to 14.6
	{*R*‡	*21*	*6.52(0.11)*	*0.44(0.26)*	*0.52*	*0.36*	*5.4 to 7.4*	*0.11 to 6.5*}
	N	16	6.61(0.09)	0.71(0.15)	0.34	0.80	5.2 to 7.3	0.06 to 6.1
	All	80	6.69(0.04)	0.74(0.07)	0.40	0.78	5.2 to 8.1	0.01 to 14.6
log (MD) = *a* + *b* * M	SS	43	−7.03(0.55)	1.03(0.08)	0.34	0.90	5.6 to 8.1	0.01 to 14.6
	{*R*	*21*	*−1.84(1.14)*	*0.29(0.17)*	*0.42*	*0.36*	*5.4 to 7.4*	*0.11 to 6.5*}
	N	16	−5.90(1.18)	0.89(0.18)	0.38	0.80	5.2 to 7.3	0.06 to 6.1
	All	80	−5.46(0.51)	0.82(0.08)	0.42	0.78	5.2 to 8.1	0.01 to 14.6
M = *a* + *b* * log (AD)	SS	29	7.04(0.05)	0.89(0.09)	0.28	0.89	5.6 to 8.1	0.05 to 8.0
	{*R*	*15*	*6.64(0.16)*	*0.13(0.36)*	*0.50*	*0.10*	*5.8 to 7.4*	*0.06 to 1.5*}
	N	12	6.78(0.12)	0.65(0.25)	0.33	0.64	6.0 to 7.3	0.08 to 2.1
	All	56	6.93(0.05)	0.82(0.10)	0.39	0.75	5.6 to 8.1	0.05 to 8.0
log (AD) = *a* + *b* * M	SS	29	−6.32(0.61)	0.90(0.09)	0.28	0.89	5.6 to 8.1	0.05 to 8.0
	{*R*	*15*	*−0.74(1.40)*	*0.08(0.21)*	*0.38*	*0.10*	*5.8 to 7.4*	*0.06 to 1.5*}
	N	12	−4.45(1.59)	0.63(0.24)	0.33	0.64	6.0 to 7.3	0.08 to 2.1
	All	56	−4.80(0.57)	0.69(0.08)	0.36	0.75	5.6 to 8.1	0.05 to 8.0

*MD—maximum displacement (m); AD—average displacement (M).
†SS—strike slip; R—reverse; N—normal.
‡Regressions for reverse-slip relationships shown in italics and brackets are not significant at a 95% probability level.

表 6.1.9 不同網格尺寸之參數對照表(Petersen 等人，2011)

Cell Size (m^2)	$a(z)$	$b(z)$	σ (standard deviation)
25 × 25	−1.1470	2.1046	1.2508
50 × 50	−0.9000	0.9866	1.1470
100 × 100	−1.0114	2.5572	1.0917
150 × 150	−1.0934	3.5526	1.0188
200 × 200	−1.1538	4.2342	1.0177

表 6.1.10 遠離平移斷層主斷層線之破裂機率內插點資料(Petersen 等人，2011)

Cell Size (m^2)	p_0 (%)	p_1 (%)	p_2 (%)	r_1 (m)	r_2 (m)
25 × 25	74.541	7.8690	2.0108	100	200
50 × 50	87.162	4.8206	2.6177	100	200
100 × 100	90.173	18.523	6.6354	100	200
150 × 150	87.394	19.592	7.0477	150	300
200 × 200	92.483	18.975	7.4709	200	400

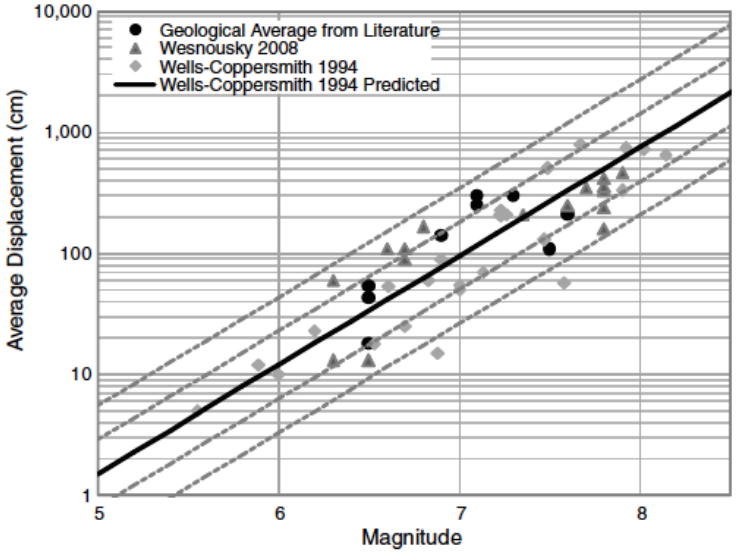


圖 6.1.38 地震規模與主斷層線平均位移之關係-Wells 與 Coppersmith (1994) 經驗公式與 Petersen et al. (2011)資料比較(Petersen 等人，2011)

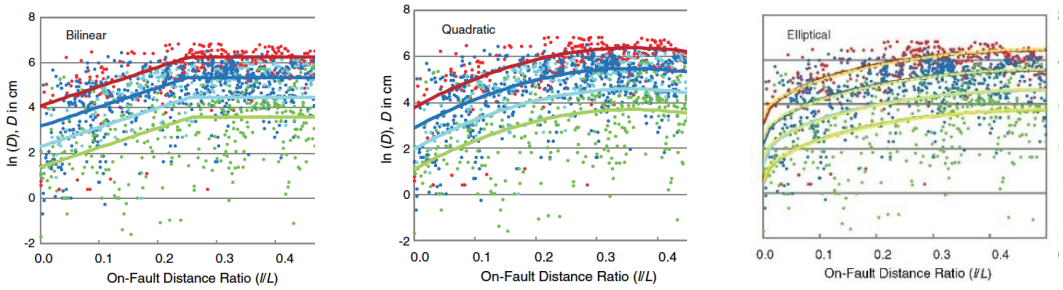


圖 6.1.39 位移量(D)與主斷層位置之關係，左：雙線式；中：多項式；右：橢圓式。由上而下之曲線或資料點顏色紅、藍、淡藍以及綠分別代表地震規模 8.0、7.5、7.0 以及 6.5 之資料。(Petersen 等人，2011)

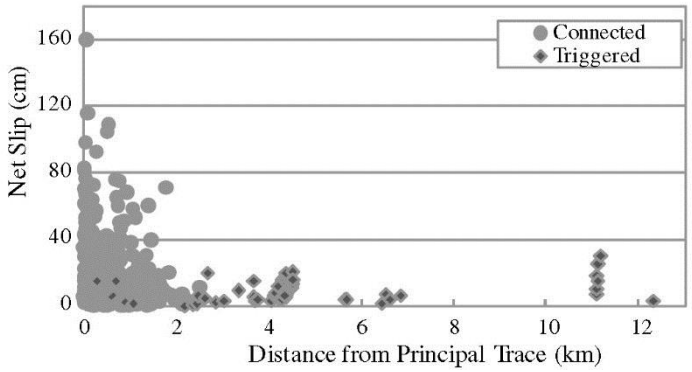


圖 6.1.40 遠離平移斷層之主斷層線位移量分佈圖(Petersen 等人，2011)

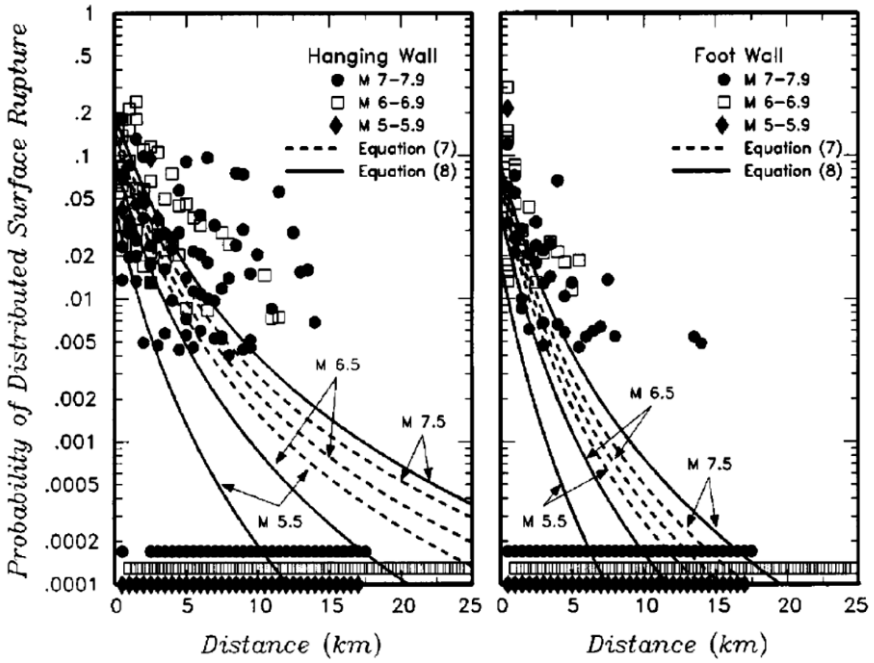


圖 6.1.41 遠離正斷層主斷層線之地表破裂機率與距離關係(Youngs 等人，2003)

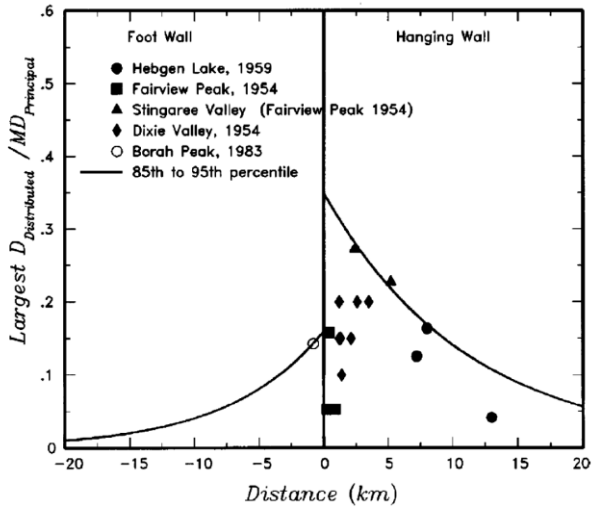


圖 6.1.42 正斷層上盤及下盤遠離主斷層線之正規化地表位移以及距離分布圖(Youngs 等人，2003)

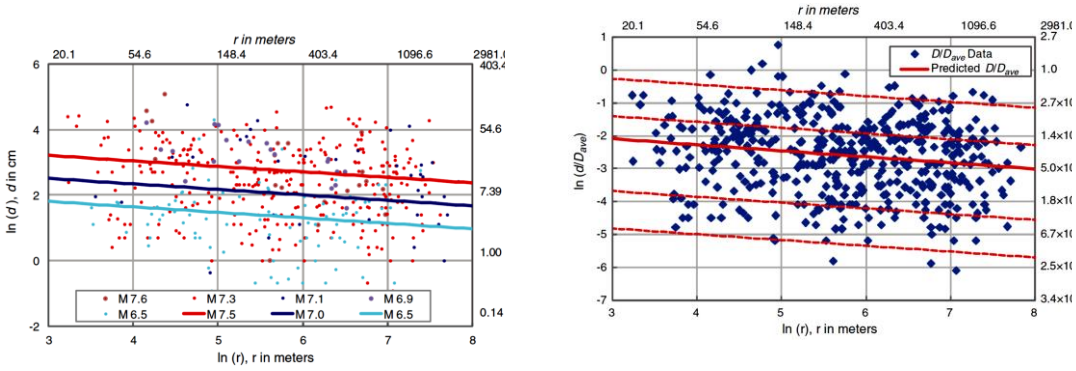


圖 6.1.43 遠離平移斷層主線位移(左圖)及正規化位移(右圖)與距離之關係

(Petersen 等人，2011)

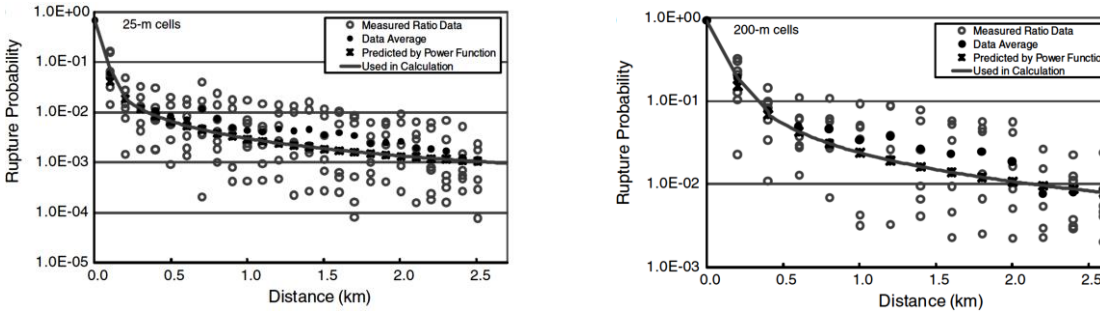


圖 6.1.44 不同網格邊長(左圖：25 公尺；右圖：200 公尺)對應之破裂機

率與距離關係(Petersen 等人，2011)

第七章、結論

7.1 現地調查與文獻整理

A. 本研究匯集了 16 篇發表於 2001 之後有關同震地表破裂的文章，共包含 2 起正斷層事件，3 起逆斷層事件，6 起橫移斷層事件及其引致的破壞帶或變形帶寬，收錄在表 2.1.2 中。

B. 921 地震斷層引致的地形崖，於竹山槽溝場址其形貌有顯著的不同，北側地表剖面類似單斜褶皺(monoclinal profile)，南側則類似拋物線狀(parabolic profile)。竹山槽溝南北牆上的地質構造差異，主因為兩主要斷層，即上位斷層(upper fault)和下位斷層(lower fault)，於側向上的位態變化、錯距差異及分岔現象所造成。且兩牆面上的構造在地震事件 E4(於 1540-1810 cal yr B.P.後，且接近 1380-1550 cal yr B.P.)前，應無差異，其中的沉積單元僅於約 10 公尺的範圍中因變形而傾斜，於此範圍外仍保持水平，整體上為呈類似階梯狀(step-like)的單斜褶皺構造(monocline)。

7.2 砂箱實驗

D. 逆斷層離心模型試驗成果

離心機砂箱之斷層傾角為 60 度，在砂土試體實驗結果中得到覆土層之影響範圍約為 **1 倍覆土層厚度**；在黏土試體實驗結果中得到覆土層之影響範圍約為 **2.2 倍覆土層厚度**。而在砂黏土互層試體實驗結果中可以看到，砂土覆蓋在黏土層上地表變形較平緩，且影響範圍較廣。而黏土層覆蓋在砂土層上面，相對於前者，則相反過來；黏土層的剪力強度減少，坡度變緩，其影響範圍也隨著增加。

E. 正斷層離心模型試驗成果

離心機砂箱之斷層傾角為 60 度，在砂土試體實驗結果中得到覆土層之影響範圍約為 **0.8 倍覆土層厚度**；在黏土試體實驗結果中得到覆土層之影響範圍約為 **1.9 倍覆土層厚度**。而在砂黏土互層的試體中可以看到，若黏土覆蓋在砂土尚且黏土強度較高，則錯動後的地表裂縫較窄，發生地表斷層裂縫地點較遠離斷層跡

出露地表處，黏土層厚度較厚者且會發生兩個河階；而黏土層厚度較薄者，垂直裂縫較深，且只發生一個河階。土壤強度較低者，斷層地表影響範圍較寬，垂直裂縫最淺且地表斷層裂縫處較接近斷層跡出露地表處。

F. 橫移斷層 1g 模型試驗成果

斜移斷層錯動達 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。

純滑移與滑移或抬升，地表影響範圍以錯移量較大的 Sy(滑移)控制；滑移與抬升並存時，地表影響範圍以較大錯移量控制。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。

7.3 數值模擬

A. 用離心模型試驗升 g 過程中，所量測到的地表沈陷來校正 PFC2D 的微觀參數K_n，在固定的$\frac{K_n}{K_s}=3$條件下，可以決定K_n隨覆土應力(或深度)增加而增加的函數關係。利用校正所得的微觀參數，以 PFC2D 數值試驗與 80g 物理模型試驗之地表沈陷剖面進行比較，顯示採用$K_n=0.58\times\frac{10^7N}{m}$條件下，m=0.4，$\frac{K_n}{K_s}=3$，及μ = tan36°=0.726，逆斷層之模擬成果和離心模型試驗的成果相當吻合。

B. 由山腳斷層五股剖面的數值模擬結果中可以看到，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。

C. 由 PFC2D 之逆斷層錯動的模擬分析及藉由包絡線之回歸分析，可以得到上盤、下盤之影響範圍方程式及斷層出露點 $x_{outcropping}$ 之回歸方程式，各方程式分述如下：

當斷層傾角小於等於 37.5°時，r>0

上盤影響範圍為：$\mathbf{x_{1m} = -1.133 + 0.026r}$

下盤影響範圍為：$\mathbf{x_2 = 1.282 + 0.037r}$

出露點位置為：$\mathbf{x_{outcropping} = 1.102 + 0.031r}$

當斷層傾角大於 37.5°時，r>0

上盤影響範圍為：$\mathbf{x_1 = -0.612 - 0.022r}$

下盤影響範圍為：$\mathbf{x_2 = 1.282 + 0.037r}$

出露點位置為：$\mathbf{x_{outcropping} = 1.102 + 0.031r}$

當基盤垂直錯動(s)對土層厚度(H)之正規化比值 r=25%時且斷層傾角小於 37.5°時，在斜率 f'=1/150 下，地表變形最大影響範圍為 3.99H，其中上盤影響範圍(由 x_{1m} 至 $x_{outcropping}$)約為 3.69H、下盤影響範圍(由 $x_{outcropping}$ 至 x_2)約為 0.3H。斷層傾角低於 37.5 度的逆斷層錯動，會產生逆衝斷層，因此也增加了地表變形的影響範圍。

D. 由 PFC2D 之正斷層錯動的模擬分析及藉由包絡線之回歸分析，可以得到上盤、下盤之影響範圍方程式，各方程式分述如下：

當 0<r<3%時

上盤影響範圍為：$\mathbf{x_1 = -0.02 - 0.025r}$

下盤影響範圍為：$\mathbf{x_2 = 0.01 + 0.08r}$

當 r＞3%時

上盤影響範圍為：$\mathbf{x_1 = -0.232 - 0.039r}$

下盤影響範圍為：$\mathbf{x_2 = 0.198 + 0.029r}$

當基盤垂直錯動(s)對土層厚度(H)之正規化比值 r=25%時，且在斜率 f'=1/150 下，地表變形最大影響範圍為 2.41H。

E. 低傾角的斷層錯動，會引致愈廣大的地表變形的影響範圍。斷層錯動通過的上覆土層具有愈大的摩擦角或剪力強度，則斷層錯動引致地表變形的影響範圍愈小。隨著斷層錯動比的增加，地表變形的影響範圍也愈大。利用本研究建議的圖 5.3.23 及圖 5.3.3，可以提供工程師評估不同傾角的斷層錯動引致之地表變形的最大影響範圍。在此範圍內的地表變形剖面的斜率超過 1/150，可能會造成結構物的損害。

7.4 斷層與基礎互制關係

A. 針對淺基礎而言，相關文獻均指出不論是在正斷層或是逆斷層錯動下，其相對於斷層破裂帶之位置在上盤、跨過斷層帶或是下盤，均會使得基礎版所受應力以及彎矩有大幅增加的現象，對於正斷層而言，淺基礎若是位於上盤或跨過剪裂帶，則其所受彎矩及應力會較位於下盤位置之彎矩及應力大，此外，對於基礎之旋轉角而言，同樣是位於正斷層下盤處之基礎會較位於上盤及跨過斷層帶旋轉角小。對於逆斷層而言，不論淺基礎在哪個位置(甚至遠離逆斷層位於上盤的位置)，錯動造成之地表變形均會使得基礎版所受應力及彎矩大幅提高，不利於基礎版之力學表現，僅由旋轉角看來，位於上盤處的淺基礎在逆斷層錯動時，其值較跨過斷層帶以及下盤基礎要小。此外，淺基礎載重會使得剪裂帶有偏移之效果，可避免斷層破裂帶直接於基礎下方出現，而此一現象將伴隨基礎之剛體旋轉，可能使得基礎局部與土壤分離，造成基礎局部應力過大而破壞，淺基礎載重的效果有二，其一使得斷層錯動造成不平的地表面變得較平，其二使得基礎下方之應力分佈較為集中，將斷層破裂帶導開。上述關於淺基礎之討論中，由於斷層錯動均會使得彎矩(值及方向)產生變化，代表工程設計上若要考慮斷層錯動之影響，基礎版佈設鋼筋之位置應有所不同，但由於現實中較難準確判斷斷層破裂帶之出露位置，因此在工程設計上，應該以各結構物之重要程度(有無人員使用等)，來決定基礎工程的設計考量。

B. 針對樁基礎而言，由文獻以及現地調查之結果均指出，正斷層或逆斷層附近若有樁基礎，則斷層錯動下對於樁基均會有相當嚴重的損壞，其損壞的原因

主要為樁帽大量的旋轉以及位移，此外，文獻的數值分析中由於假設樁不可斷裂，因此研究結果中僅見到剪裂帶穿過樁身，但由現地調查之結果可以發現，一旦斷層剪裂帶可能穿過樁身，其唯一的結果即是將基樁剪穿，造成樁身分離。由車籠埔斷層錯動造成基樁損壞情形看來，大多數位於上盤且靠近破裂帶之基樁均遭到較為嚴重之損壞，而在下盤的基樁則沒有太多位移，此一結果或許可做為未來樁基礎選擇位置時之參考(若一定要在臨近斷層兩側施做基樁的話)。

C. 針對沉箱基礎而言，由於其牆身之高剛度，可能會使得正斷層或逆斷層錯動時之剪裂帶發展產生偏向、分枝或是發散現象，針對沉箱在正斷層錯動時之行為看來，其破裂帶發展可能有五種情形，其對應之沉箱位置均位於跨過斷層破裂帶或位於上盤處，情形 1 為破裂帶在沉箱兩側產生分枝，情形 2 為破裂帶在沉箱底部分佈範圍變廣，情形 3 為在沉箱靠下盤處產生主動破壞面，情形 4 為在沉箱靠上盤處產生被動破壞面，情形 5 為斷層剪裂帶被導向斷層下盤，且剪裂帶較為集中；而沉箱與逆斷層錯動之互制機制亦可依其位置大致分為三類，(1)當自由場狀況下之斷層破裂帶跨過沉箱右側時，此位置之斷層破裂帶會被導向上盤，使得沉箱幾乎位於下盤，此狀況下沉箱會有大量旋轉角產生，斷層破裂帶會擦過沉箱右側，導致沉箱右側與土壤有大量剪位移產生(2)當自由場狀況下之斷層破裂帶大約略過沉箱右側的基底處，其斷層破裂帶會開始產生分枝，但位於沉箱左側之剪裂帶發展並不明顯，沉箱兩側的土壤會產生剪力破壞，沉箱有大量的旋轉以及位移；(3)若沉箱位於自由場狀況下之斷層破裂帶偏左處，則斷層破裂帶會被導向下盤處，而在沉箱右側偏上盤處，則會有明顯的土壤/沉箱介面滑動機制產生，此一位置會有最大的垂直位移，且與斷層上盤一起運動。若沉箱位置繼續向上盤移動，則剪裂帶再度集中成一條剪裂帶，且略過沉箱左側並向上盤發展。

D. 針對隧道而言，根據現地對於逆斷層之調查結果指出，受到最嚴重損壞的隧道大多位於逆斷層之上盤，隧道位於逆斷層之下盤或其他區域則受到的損壞較低，此外，位於上盤處受損壞的隧道中，以位於邊坡旁或靠近開口處之隧

道受損較為嚴重，高覆土應力狀況下的隧道其受損情形較為輕微。由數值分析結果指出，隧道若位於逆斷層之三角剪切帶內，則其剪切帶之發展會與土層緊密程度、覆土應力以及隧道剛性有關，且受到斷層錯動時，可能會使得隧道有大量之旋轉及位移量產生。對於淺層隧道受到正斷層錯動時之影響，其受力機制主要可分為三類，當隧道主體位於自由場破裂帶之下盤時，隧道受彎矩狀況會使其向上拱(hogging)；若隧道主體位於自由場破裂帶之上盤時，隧道受彎矩狀況會使其向下凹(sagging)；若斷層破裂帶通過隧道中間位置，會發現隧道之受力乃處於上述兩種極端狀況之間，此外，隧道之存在可能會使斷層破裂帶轉向、分枝以及造成剪裂帶之發散，此與上述之沉箱基礎效應類似，隧道上方之覆土重量亦有兩個作用，一個是向下推隧道，使得隧道下方的土壤受壓，將斷層錯動產生之不規則位移壓平, 其二，增加隧道下方土壤之圍壓，使斷層破裂帶轉向、分枝或發散產生。

參考文獻

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

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

Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Bransby, M., Davies, M. & EL Nahas, A. (2009), Normal Fault Rupture Interaction with Strip Foundations. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 135, 359-370.

Anastasopoulos, I., Kourkoulis, R., Gazetas, G., and Tsatsis, A. (2013), Interaction of piled foundation with a rupturing normal fault. Géotechnique 63, 1042-1059.

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

Audemard, F. A. (2006), Surface rupture of the Cariaco July 09, 1997 earthquake on the El Pilar fault, northeastern Venezuela. Tectonophysics, 424, 19–39.

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

Baziar, M. H., Ali, N., Lee, C. J. and Hung, W. Y. (2014), Centrifuge modeling of interaction between reverse faulting and tunnel. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volume 65, October 2014, Pages 151–164.

Boncio, P., Galli, P., Naso, G., and Pizzi, A. (2012), Zoning Surface Rupture Hazard along Normal faults: Insight from the 2009 Mw 6.3 L'Aquila, Central Italy, Earthquake and other Global Earthquakes. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 102, No. 3, pp. 918–935, June 2012, doi: 10.1785/0120100301.

Bonilla, M.G. (1982) "Evaluation of potential surface faulting and other tectonic deformation". U.S. Geological Survey, Open-File Report 82-732.

Bray, J. D. (2001), Developing mitigation measures for the hazards associated with earthquake surface fault rupture. Proceedings of workshop on seismic fault-induced failures, Tokyo, 55-80.

Bray, J.D. and Kelson, K.I. (2006), Observations of surface fault rupture from the 1906 earthquake in the context of current practice. Earthquake spectra 22, S69-S89.

Chang, Y.Y., Lee, C.J., Huang W.C., Huang, W.J., Lin, M.L., Hung, W.Y., 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, Vol. 11, No.2, pp.79-88.

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.

Chen, W. S., Lee, L. S., Yang, C. C., Liu, L. H., and Chen, Y. C. (2003), Paleoseismic study of the Chelungpu Fault in the Chushan, Nantao County. Field report of Central Geological Survey, Taiwan, no. 92–7. Project no. 5226902000–03–9201.

Chen, W. S., Yang, C. C., Yen, I C., Lee, L. S., Lee, K.J., Yang, H. C., Chang, H. C.,

Ota, Y., Lin, C. W., Lin, W. H., Shih, T. S., and Lu, S. T. (2007), Late Holocene Paleoseismicity of the South Part of the Chelungpu Fault in Central Taiwan: Evidence from the Chushan Excavation Site. Bulletin of the Seismological Society of America 97 (1B), 1-13.

Clifton, A. and Einarsson, P. (2005), Styles of surface rupture accompanying the June 17 and 21, 2000 earthquakes in the South Iceland Seismic Zone. Tectonophysics, 396, 141– 159.

Daryono, M. R., Natawidjaja, D. H., and Sieh, K. (2012), Twin-Surface Ruptures of the March 2007 M >6 Earthquake Doublet on the Sumatran Fault. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 102, No. 6, pp. 2356–2367, December 2012, doi: 10.1785/0120110220.

Gazetas, G., O. Zarzouras, V. Drosos and I. Anastasopoulos (2014), Bridge–Pier Caisson foundations subjected to normal and thrust faulting: physical experiments versus numerical analysis." Meccanica: 1-14.

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.

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

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

Kaneda, H., Nakata, T., Tsutsumi, H., Kondo, H., Sugito, N., Awata, Y., Akhtar, S. S., Majid, A., Khattak, W. Awan, A. A., Yeats, R. S., Hussain, A., Ashraf, M., Wesnousky, S. G., and Kausar, A. B. (2008), Surface Rupture of the 2005 Kashmir, Pakistan, Earthquake and Its Active Tectonic Implications. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 98, No. 2, pp. 521–557, April 2008, doi: 10.1785/0120070073.

Kelson, K. I., Kang, K. H., Page, W. D., Lee, C. T. and Cluff, L. S. (2001), Representative styles of deformation along the Chelungpu Fault from the 1999 Chi-Chi (Taiwan) earthquake: Geomorphic characteristics and responses of man-made structures. Bulletin seismolgical society america 91(5), 930-952.

Konagai, K. (2005), Data archives of seismic fault induced damage. Journal of soil dynamics and earthquake engineering 25, 559-570.

Konagai, K. ed. (2001), 1st Workshop on Seismic Fault-induced Failures- Possible Remedies for Damage to Urban Facilities, Tokyo, Japan. http://shake.iis.u-tokyo.ac.jp/seismic-fault/

Konagai, K. ed. (2003), JSCE/Eq AP Workshop on Seismic Fault-induced Failures- Possible Remedies for Damage to Urban Facilities, Tokyo, Japan. http://shake.iis.u-tokyo.ac.jp/seismic-fault/

Kulhawy, F.H. and Mayne, P.W. (1990), Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design. EPRI Report, Cornell University, Ithaca, New York

Lazarte, C. A., Bray, J. D., Johnson, A. M. and Lemmer, R. E. (1994), Surface breakage of the 1992 Landers earthquake and its effects on structures. Bulletin of the seismological society of america 84(3), 547-561.

Lazarte, C., and Bray, J. (1996), A study of strike-slip faulting using small-scale models. ASTM geotechnical testing journal, 19(2), 118-129.

Li, C. Y., Wei, Z. Y., Ye, J. Q., Han, Y. B., and Zheng, W. J. (2010), Amounts and styles of coseismic deformation along the northern segment of surface rupture, of the 2008 Wenchuan Mw 7.9 earthquake, China. Tectonophysics, 491, 35–58.

Lin, A., and Nishikawa, M. (2011), Riedel shear structures in the co-seismic surface rupture zone produced by the 2001 Mw 7.8 Kunlun earthquake, northern Tibetan Plateau. Journal of Structural Geology, 33, 1302-1311.

Lin, A., Guo, J., Fu, B. (2004), Co-seismic mole-track structures produced by the 2001 Ms 8.1 Central Kunlun earthquake, China. Journal of Structural Geology 26,1511-1519.

Lin, A., Shinji T., Rao, G., Tsuchihashi, S., and Yan, B. (2013), Structural Analysis of Coseismic Normal Fault Zones of the 2011 Mw 6.6 Fukushima Earthquake, Northeast Japan. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 103, No. 2B, pp. 1603–1613, May 2013, doi: 10.1785/0120120111.

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

McCalpin, J. P. (1998), Statistics of Paleoseismic Data, Final Technical Report, National Earthquake Hazards Reduction Program, U.S. Geological Survey: 54 pp.

McClay, K., and Dooley, T. (1995), Analogue models of pull-apart basins. Geology, 23(8), 711-714. doi: Doi 10.1130/0091-7613(1995)023<0711:Amopab>2.3.Co;2

McClay, K., and White, M. (1995), Analogue modelling of orthogonal and oblique rifting. Marine and Petroleum Geology, 12(2), 137-151. doi: Doi 10.1016/0264-8172(95)92835-K

Mitra, S., and Paul, D. (2011), Structural geometry and evolution of releasing and restraining bends: Insights from laser-scanned experimental models. AAPG bulletin, 95(7), 1147-1180. doi: Doi 10.1306/09271010060

Moss, R. E. S. and Ross, Z. E. (2011), Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis for Reverse Faults. Bulletin of the Seismological Society of America, 101, 1542-1553.

Naylor, M. A., Mandl, G. and 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

Ohya, S., Imai, T., and Matsubara, M. (1982) "Relationships between N value by SPT and LLT Pressuremeter Results", Proceedings, 2nd European Symposium on Penetration Testing, Vol.1, Amsterdam, pp125-130

Petersen, M. D., Dawson, T. E., Chen, R., Cao, T., Wills, C. J., Schwartz D. P. and Frankel, A. D. (2011), Fault Displacement Hazard for Strike-Slip Faults. Bulletin of the Seismological Society of America 101(2): 805-825.

Pezzopane, S. K. and Dawson, T. E. (1996), Fault displacement hazard: A summary of issues and information : Seismotectonic Framework and Characterization of Faulting at Yucca Mountain, Nevada, U.S. Geological Survey Administrative Report prepared for the U.S. Department of Energy. Chapter 9: pp. 160.

PFC2D version 3.0 online user manual.

Ren, J., Chen, G., Xu, X., Zhang, S., and Mao, C. (2010), Surface Rupture of the 2008 Wenchuan, China, Earthquake in the Qingping Stepover Determined from Geomorphologic Surveying and Excavation, and Its Tectonic Implications. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 100, No. 5B, pp. 2651–2659, November 2010, doi: 10.1785/0120090267.

Schmertmann, J. H. (1975), Measurement of in-situ shear strength. Proceedings of a Conference on insitu measurement of soil properties.

Schrank, C. E., and Cruden, A. R. (2010), Compaction control of topography and fault network structure along strike-slip faults in sedimentary basins. Journal of Structural Geology, 32(2), 184-191. doi: DOI 10.1016/j.jsg.2009.11.003

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

Soto, R., Martinod, J., and Odonne, F. (2007), Influence of early strike-slip

deformation on subsequent perpendicular shortening: An experimental approach. Journal of Structural Geology, 29(1), 59-72.

Toscani, G., Di Bucci, D., Ravaglia, A., Seno, S., Fracassi, U., and Valensise, G. (2009), Propagation of an inherited strike-slip fault through a foreland-chain system: quantitative aspects from analogue modeling and applications. Bollettino della Società geologica italiana, 128(1), 107-122.

Treiman, J. A., Kendrick, K. J., Bryant, W. A., Rockwell, T. K., and McGill, S. F. (2002), Primary Surface Rupture Associated with the Mw 7.1 16 October 1999Hector Mine Earthquake, San Bernardino County, California. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 92, No. 4, pp. 1171–1191, May 2002.

Villamor, P., Litchfield, N., Barrell, D., Dissen, R. V., Hornblow, S., Quigley, M., Levick, S., Ries, W., Duffy, B., Begg ,J., Townsend, D., Stahl, T., Bilderback, E., Noble, D., Furlong, K., and Grant, H. (2012), Map of the 2010 Greendale Fault surface rupture, Canterbury, New Zealand: application to land use planning, New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 55:3, 223-230, DOI: 10.1080/00288306.2012.680473.

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

Wells, D. L. and Coppersmith, K. J. (1994), New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. Bulletin of the Seismological Society of America 84(4): 974-1002.

Wesnousky, S. G. (2008), Displacement and Geometrical Characteristics of Earthquake Surface Ruptures: Issues and Implications for Seismic-Hazard Analysis and the Process of Earthquake Rupture. Bulletin of the Seismological Society of America 98(4): 1609-1632.

Wheeler, R. L. (1989), Persistent segment boundaries on basin-range normal faults. Proceedings, Conference XLV-Fault Segmentation and Controls on Rupture Initiation and Termination.

Xu, X. W., Yu, G. H., Ma, W. T., Klinger, Y. and Tapponnier, P. (2008), Rupture behavior and deformation localization of the Kunlunshan earthquake (Mw7.8) and their tectonic im-plications. Sci China Ser D-Earth Sci, vol. 51, no. 10,1361-1374.

xXu, X., Yu, G., Klinger, Y., Tapponnier, P. and Van Der Woerd, J. (2006), Reevaluation of surface rupture parameters and faulting segmentation of the 2001 Kunlunshan earthquake (Mw7.8), northern Tibetan Plateau, China, J. Geophys. Res., 111, B05316, doi:10.1029/2004JB003488.

Younes, A. L. and Engelder, T. (1999), Fringe Cracks: Key Structures for the Interpretation of the Progressive Alleghanian Deformation of the Appalachian Plateau. Geological Society of America Bulletin, v.111, no. 2, pp. 219-239.

Youngs, R. R., Arabasz, W. J., Anderson, R. E., Ramelli, A. R., Ake, J. P., Slemmons, D. B., Mccalpin, J. P., Doser, D. I., Fridrich, C. J., Swan, F. H., Rogers, A. M., Yount, J. C., Anderson, L. W., Smith, K. D., Bruhn, R. L., Knuepfer, P. L. K., Smith, R. B., Depolo, C. M., O'Leary, D. W., Coppersmith, K. J., Pezzopane, S. K., Schwartz, D. P., Whitney, J. W., Olig, S. S. and Toro, G. R. (2003), A Methodology for Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis (PFDHA). Earthquake Spectra, 19, 191-219.

丸山正、齊藤英二、齊藤勝 (2012) 變動地形-基於 2011 年 4 月 11 日福島縣浜通的地震相關的斷層活動性的古地震學檢討，Japanese Active Fault and Earthquake Research Center News No. 34. (http://unit.aist.go.jp/actfault-eq/index.html) (日文)

王文禮、蘇灼謹、林峻弘、諶家瑞、王泰典、黃燦輝 (2001)，台灣集集大地震

山岳隧道受損情形之探討，第二屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會，1 月 10~11 日，台北，466-477
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。
林朝宗 (2001)，台北都會區地質災害研討會論文集。
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。
孫思優、吳柏林、田永銘 (1999)，活動斷層附近禁、限建問題探討，1999 集集大地震災害調查研討會，台北，台灣大學， VI-33-VI-66。
盛仲達 (2008)，由山坡地社區災害案例管制沿革探討未來管理機制，碩士論文，國立台灣大學土木工程研究所。
陳正興、楊樹華 (2003)，土壤－結構互制作用對於結構物動力反應之影響，地工技術，第 95 期，pp. 75-84
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。
蕭謙麗、林明聖 (2000)，九二一地震與車籠埔斷層的省思。環境教育季刊(41)：8-13。
蘇瑛敏、蔡承璋 (2003)，活動斷層帶限制發展處理機制與策略評估之研究，都市與計劃，30(4)，301-323。

附錄 歷年委員意見答覆表

民國 100 年期初委員意見

100 年服務建議書內容	
審查意見	審查意見答覆與處理情形
1.建議將本年度與後續年度預計進行之活動斷層列表,以便瞭解未來整體規劃。	1.第一年度(100 年)計畫以逆斷層為主，預計進行：車籠埔斷層、新城斷層；第二年度(101 年)以正斷層為主，預計進行：山腳斷層；第三年度(102 年)以橫移斷層為主，預計進行：米崙斷層。已彙整於第 13 頁，如表 3-2 所示。
2.請明確列出計畫主持人與協同主持人之工作分工。	2.已根據本年度工作項目,將計畫依照計畫主持人與協同主持人之團隊分工，已彙整於第 15 頁表 3-3 所示，
3.請調整計畫協同主持人人數,建議部分可調整為研究員;兼任助理月支酬金請調整一致。	3.已將計畫研究團隊進行最適調整及分工,經費規劃也已採用所內常用規劃，進行調整。

民國 100 年期中委員意見

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

6.	未來年度之工作項目建議考量斷層的斜滑移運動特性，並考慮修正本案研究的斷層標的，及時程安排。	斜滑移運動特性之斷層型態，初步規劃為米崙斷層，時程安排於本計畫第三年度，並進行 1g 室內試驗。
7.	p.30 第 13 行所述車籠埔斷層北接三義斷層有何證據？（兩斷層上、下盤接觸關係（岩層）不同，且集集地震地表破裂北段從豐原轉向東北東經石岡至卓蘭，而大甲溪北岸后里台地南緣所見之三義斷層露頭，於集集地震時並未見破裂情形）。	依構造地形學觀念推論，車籠埔斷層與三義斷層可能具有共同滑脫面。此見解亦參考地調所(2008)特刊 21 號第 89 頁描述，但考量非本研究關鍵課題，故以修正於稿件內。
8.	p.32 所述「近斷層之變形特徵……，一定要輔以地表調查及…」,而集集地震發生已過十幾年，變形帶寬度大部份已無可考，更甭說斷層帶上結構物變形破壞狀況。而本案進行現地調查人員是否曾經歷並調查過集集地震？現地調查能否得到所需的數據？	本計畫研究團隊成員(林銘郎-計畫主持人、黃文正-研究員)過去曾於集集地震發生初期進行現場調查，對斷層沿線地景地物有一定了解，並於本計畫期間內進行復勘，本次調查主要了解斷層跡沿線房舍復育情況，以了解禁建法令規範是否落實。
9.	集集地震已過十幾年，如何重建地表破裂跡型態？	並無重建地表破裂跡型態，將採用團隊成員過去調查成果，以輔以了解破裂型態差異對地表結構物與土層特性之結構互制行為。
10.	竹山槽溝南、北牆就顯現不相同的變形情況，集集地震地表破裂長約達 100 公里，所選的研究場址的結果能否用於整個車籠埔斷層沿線的變形，那藉此劃定活動斷層敏感區對未來地質法執行上是否爭議會很多？	針對車籠埔斷層槽溝挖掘調查之研究結果顯示，每次大地震造成之地表破裂跡位置，是依其覆蓋在基盤之上覆土層厚度而定，當上覆土層厚度愈厚，材料性質愈疏鬆，斷層可能出露地表的位置變動性愈大，且斷層具有重複性，故針對槽溝及漕溝鄰近工程鑽井彙整土層變形參數，並透過簡化分析以其了解變形帶可能範圍，再以現地調查輔助分析結果。
11.	p.76-p.87 共 12 頁敘述「新城斷層」,所為何事？請說明。此外，以集集地震地表破裂變形研究結果，用以驗證(或應用至)未有任何地表變形記錄的新城斷層，是否恰當 ？	分析模型模擬車籠埔斷層之竹山槽溝及中正公園槽溝，帶入槽溝土層特性以模擬斷層滑移時地表變形特徵，再以新城斷層(另一逆斷層)之土層特性參數驗證數值模型，以建立土層特性與地表變形型態之關係。
12.	摘要請針對重要研究成果進行摘述。	已於稿件內修訂，並摘述研究成果。
13.	公尺、米、m 請統一。	感謝委員提醒，已於稿件內修訂。
14.	p.30 第 16 行台「東」盆地應為台中盆地之筆誤，請修正。	為台中盆地誤植，已於稿件內修訂。
15.	圖 3-1-9 建議加入鑽探孔號或名稱。	感謝委員提醒，已於稿件內修訂。
16.	圖說編排方式請統一(對齊、句號)。	感謝委員提醒，已於稿件內修訂。
17.	圖 3-1-61~63 須註明出處。	感謝委員提醒，已於稿件內修訂。
18.	工作內容主要是土壤層的部份，但岩盤內若有較複雜的構造或斷層面轉折，也可能造成大的變形帶。所以，報告書內也請對所使用方法的限制做說明。	根據黃文正等人(2000)、李錫堤等人(2000)及 Kelson *et al.*(2001)的研究結果，可以看到斷層錯動面除了直線形之外，還有可能是弧形、有轉折點或是其他構造，而，如圖 2-1-9(a)、(b)，未來將對其他之構造形態再做研究，並匯集成表，以供參考。
19.	應把尺度較大的逆(背)衝斷層的變形分布(如草屯地區)列入研究成果合理性分析。	雖然在車籠埔斷層之現地觀察及數值模擬中皆可看到逆(背)衝斷層的出現，但為了簡化問題，本研究先以單一條斷層錯動面為研究對象。

20.	請注意使用 PFC 模擬黏土方法之正確性，均質砂土層 W/H>均質黏土層 W/H>砂土層與黏土層互層之原因需要找出，或解釋。	由於目前 PFC 這套軟體中尚無巨觀與微觀參數之間的轉換公式或內建程式，本研究使用 PFC 模擬黏土時將黏土視為沒有摩擦角，但有凝聚力，也就是在模擬黏土層裡的顆粒間摩擦力設為 0，而顆粒之間加上鍵結力，透過更改鍵結力的強度大小，可以模擬不同凝聚力的黏土。根據目前的研究結果，模擬斷層砂箱的結果中，當黏土顆粒間的鍵結力設為 1×10^3(N)，且斷盤抬升量為 6 公分時，純砂土的情況底下斷層影響範圍最小，為 17.8 公分；而純黏土的情況底下斷層影響範圍最大，為 26.4 公分；互層為兩層的時候，砂土覆蓋於黏土層上的結果是 21.2 公分，黏土覆蓋於砂土層上的結果是 26.4 公分；互層為三層的時候，砂土中間夾黏土層的結果是 23.6 公分，黏土中間夾砂土層的結果是 26.8 公分。由此結果我們可以看到最靠近地表的土層影響很大，如果是砂土層，越厚則影響範圍越大；如果是黏土層，越厚則影響範圍越小。。詳細的影響範圍之比較列於表 3-3-10。
21.	通常漕溝開挖所見斷層角度不大，但模擬所用的角度大，請說明為何。	目前數值模擬最主要的比對對象為斷層砂箱實驗，而在做斷層砂箱實驗時，如斷層傾角越小，實驗用的砂箱就要訂做的越大，因此在做室內實驗時斷層的傾角會受限於實驗的可行性，故前人在做此一實驗時多採用高角度之斷層。而未來如果數值模擬與砂箱比對有成果的話，可以再模擬低角度之斷層，將不會受到同樣的限制。
22.	數值模擬所得的結果雖類似竹山槽溝目前的變形形貌，但是模擬為 1 次斷層作用所造成，是否適用於竹山槽溝 4 次古地震事件所累積的變形結果，請考慮。	在竹山槽溝內所看到的斷層剖面除了 4 次古地震的營力之外，當然也包含了侵蝕、堆積等營力所累積起來影響，才有現今的結果。因此，以一次斷層作用所形成的結果來解釋所有的現象是不夠的，還必需在數值模擬中加入侵蝕作用及多次的斷層錯動作用。這項工作之時程安排於本計劃的第二年度。
23.	請於正式期末報告中詳列鑽探資料成果及其他資料。	感謝委員提醒，已於稿件內增補，詳見第三章第 1 節中中正公園南北井鑽探、篤行工程井鑽探土層特性整理結果及附錄。
24.	所有方法與結果之限制條件應清楚列出。	感謝委員的題醒，本研究所使用之方法學：現地調查、砂箱實驗、數值分析三種方法之限制與比較已詳列於 2.5 小節中的表 2-4-3。
25.	部份錯誤請修正，例如：p.1「地層」液化；p.95(三)地表變形觀測所述「利用地調所災後調查…」,地調所並無新城斷層之災後調查。	感謝委員提醒，已於稿件內修訂。
26.	p.1 由何證據證明大茅埔-雙冬斷層在集集地震有動過？若無活動，建議不需列於報告書中。	感謝委員提醒，已從報告書中刪除。
27.	本研究達成的目標僅能簡化到單純平直的斷層上，但斷層沿線常見有彎曲(bend)或是凸出(jog)的情形，其變形	本研究僅針對單一平直的斷層進行研究，並比對 Kelson et al.(2001) 整理了近地表變形的五種模式中的兩種模式，這兩

	行為與地表可能影響範圍均有很大的差異，是否有考慮此一部份？	種模式的斷層錯動是沿著單一平直斷盤錯動，如圖2-1-9(a)、(b)所示。
28.	第二章研究方法中提及地球物理探測，本計畫是否有進行何種地球物理探測？若無，請減少描述的篇幅。	本研究採取野外調查、文獻統整來了解研究區域內地表地形的變化及地質構造，並搭配地調所外包給顏一勤地質技師事務所所進行的鑽探工程，來了解地質構造及土壤、礫石、岩盤…等的力學性質。
29.	表 3-1-4 921 地震斷層沿線槽溝彙整表及表 3-1-3 等文獻應列出處，其餘引用他人圖表出處及參考文獻等資料亦同。	感謝委員提醒，已於稿件內修訂。

民國 100 年期末委員意見

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

6.	未來年度之工作項目建議考量斷層的斜滑移運動特性，並考慮修正本案研究的斷層標的，及時程安排。	斜滑移運動特性之斷層型態，初步規劃為米崙斷層，時程安排於本計畫第三年度，並進行 1g 室內試驗。
7.	p.30 第 13 行所述車籠埔斷層北接三義斷層有何證據？（兩斷層上、下盤接觸關係（岩層）不同，且集集地震地表破裂北段從豐原轉向東北東經石岡至卓蘭，而大甲溪北岸后里台地南緣所見之三義斷層露頭，於集集地震時並未見破裂情形）。	依構造地形學觀念推論，車籠埔斷層與三義斷層可能具有共同滑脫面。此見解亦參考地調所(2008)特刊 21 號第 89 頁描述，但考量非本研究關鍵課題，故以修正於稿件內。
8.	p.32 所述「近斷層之變形特徵……，一定要輔以地表調查及…」,而集集地震發生已過十幾年，變形帶寬度大部份已無可考，更甭說斷層帶上結構物變形破壞狀況。而本案進行現地調查人員是否曾經歷並調查過集集地震？現地調查能否得到所需的數據？	本計畫研究團隊成員(林銘郎-計畫主持人、黃文正-研究員)過去曾於集集地震發生初期進行現場調查，對斷層沿線地景地物有一定了解，並於本計畫期間內進行復勘，本次調查主要了解斷層跡沿線房舍復育情況，以了解禁建法令規範是否落實。
9.	集集地震已過十幾年，如何重建地表破裂跡型態？	並無重建地表破裂跡型態，將採用團隊成員過去調查成果，以輔以了解破裂型態差異對地表結構物與土層特性之結構互制行為。
10.	竹山槽溝南、北牆就顯現不相同的變形情況，集集地震地表破裂長約達 100 公里，所選的研究場址的結果能否用於整個車籠埔斷層沿線的變形，那藉此劃定活動斷層敏感區對未來地質法執行上是否爭議會很多？	針對車籠埔斷層槽溝挖掘調查之研究結果顯示，每次大地震造成之地表破裂跡位置，是依其覆蓋在基盤之上覆土層厚度而定，當上覆土層厚度愈厚，材料性質愈疏鬆，斷層可能出露地表的位置變動性愈大，且斷層具有重複性，故針對槽溝及漕溝鄰近工程鑽井彙整土層變形參數，並透過簡化分析以其了解變形帶可能範圍，再以現地調查輔助分析結果。
11.	p.76-p.87 共 12 頁敘述「新城斷層」,所為何事？請說明。此外，以集集地震地表破裂變形研究結果，用以驗證(或應用至)未有任何地表變形記錄的新城斷層，是否恰當 ？	分析模型模擬車籠埔斷層之竹山槽溝及中正公園槽溝，帶入槽溝土層特性以模擬斷層滑移時地表變形特徵，再以新城斷層(另一逆斷層)之土層特性參數驗證數值模型，以建立土層特性與地表變形型態之關係。
12.	摘要請針對重要研究成果進行摘述。	已於稿件內修訂，並摘述研究成果。
13.	公尺、米、m 請統一。	感謝委員提醒，已於稿件內修訂。
14.	p.30 第 16 行台「東」盆地應為台中盆地之筆誤，請修正。	為台中盆地誤植，已於稿件內修訂。
15.	圖 3-1-9 建議加入鑽探孔號或名稱。	感謝委員提醒，已於稿件內修訂。
16.	圖說編排方式請統一(對齊、句號)。	感謝委員提醒，已於稿件內修訂。
17.	圖 3-1-61~63 須註明出處。	感謝委員提醒，已於稿件內修訂。
18.	工作內容主要是土壤層的部份，但岩盤內若有較複雜的構造或斷層面轉折，也可能造成大的變形帶。所以，報告書內也請對所使用方法的限制做說明。	根據黃文正等人(2000)、李錫堤等人(2000)及 Kelson *et al.*(2001)的研究結果，可以看到斷層錯動面除了直線形之外，還有可能是弧形、有轉折點或是其他構造，而，如圖 2-1-9(a)、(b)，未來將對其他之構造形態再做研究，並匯集成表，以供參考。
19.	應把尺度較大的逆(背)衝斷層的變形分布(如草屯地區)列入研究成果合理性分析。	雖然在車籠埔斷層之現地觀察及數值模擬中皆可看到逆(背)衝斷層的出現，但為了簡化問題，本研究先以單一條斷層錯動面為研究對象。

20.	請注意使用 PFC 模擬黏土方法之正確性，均質砂土層 W/H>均質黏土層 W/H>砂土層與黏土層互層之原因需要找出，或解釋。	由於目前 PFC 這套軟體中尚無巨觀與微觀參數之間的轉換公式或內建程式，本研究使用 PFC 模擬黏土時將黏土視為沒有摩擦角，但有凝聚力，也就是在模擬黏土層裡的顆粒間摩擦力設為 0，而顆粒之間加上鍵結力，透過更改鍵結力的強度大小，可以模擬不同凝聚力的黏土。根據目前的研究結果，模擬斷層砂箱的結果中，當黏土顆粒間的鍵結力設為 1×10^3(N)，且斷盤抬升量為 6 公分時，純砂土的情況底下斷層影響範圍最小，為 17.8 公分；而純黏土的情況底下斷層影響範圍最大，為 26.4 公分；互層為兩層的時候，砂土覆蓋於黏土層上的結果是 21.2 公分，黏土覆蓋於砂土層上的結果是 26.4 公分；互層為三層的時候，砂土中間夾黏土層的結果是 23.6 公分，黏土中間夾砂土層的結果是 26.8 公分。由此結果我們可以看到最靠近地表的土層影響很大，如果是砂土層，越厚則影響範圍越大；如果是黏土層，越厚則影響範圍越小。。詳細的影響範圍之比較列於表 3-3-10。
21.	通常漕溝開挖所見斷層角度不大，但模擬所用的角度大，請說明為何。	目前數值模擬最主要的比對對象為斷層砂箱實驗，而在做斷層砂箱實驗時，如斷層傾角越小，實驗用的砂箱就要訂做的越大，因此在做室內實驗時斷層的傾角會受限於實驗的可行性，故前人在做此一實驗時多採用高角度之斷層。而未來如果數值模擬與砂箱比對有成果的話，可以再模擬低角度之斷層，將不會受到同樣的限制。
22.	數值模擬所得的結果雖類似竹山槽溝目前的變形形貌，但是模擬為 1 次斷層作用所造成，是否適用於竹山槽溝 4 次古地震事件所累積的變形結果，請考慮。	在竹山槽溝內所看到的斷層剖面除了 4 次古地震的營力之外，當然也包含了侵蝕、堆積等營力所累積起來影響，才有現今的結果。因此，以一次斷層作用所形成的結果來解釋所有的現象是不夠的，還必需在數值模擬中加入侵蝕作用及多次的斷層錯動作用。這項工作之時程安排於本計劃的第二年度。
23.	請於正式期末報告中詳列鑽探資料成果及其他資料。	感謝委員提醒，已於稿件內增補，詳見第三章第 1 節中中正公園南北井鑽探、篤行工程井鑽探土層特性整理結果及附錄。
24.	所有方法與結果之限制條件應清楚列出。	感謝委員的題醒，本研究所使用之方法學：現地調查、砂箱實驗、數值分析三種方法之限制與比較已詳列於 2.5 小節中的表 2-4-3。
25.	部份錯誤請修正，例如：p.1「地層」液化；p.95(三)地表變形觀測所述「利用地調所災後調查…」,地調所並無新城斷層之災後調查。	感謝委員提醒，已於稿件內修訂。
26.	p.1 由何證據證明大茅埔-雙冬斷層在集集地震有動過？若無活動，建議不需列於報告書中。	感謝委員提醒，已從報告書中刪除。
27.	本研究達成的目標僅能簡化到單純平直的斷層上，但斷層沿線常見有彎曲(bend)或是凸出(jog)的情形，其變形	本研究僅針對單一平直的斷層進行研究，並比對 Kelson et al.(2001) 整理了近地表變形的五種模式中的兩種模式，這兩

	行為與地表可能影響範圍均有很大的差異，是否有考慮此一部份？	種模式的斷層錯動是沿著單一平直斷盤錯動，如圖2-1-9(a)、(b)所示。
28.	第二章研究方法中提及地球物理探測，本計畫是否有進行何種地球物理探測？若無，請減少描述的篇幅。	本研究採取野外調查、文獻統整來了解研究區域內地表地形的變化及地質構造，並搭配地調所外包給顏一勤地質技師事務所所進行的鑽探工程，來了解地質構造及土壤、礫石、岩盤…等的力學性質。
29.	表 3-1-4 921 地震斷層沿線槽溝彙整表及表 3-1-3 等文獻應列出處，其餘引用他人圖表出處及參考文獻等資料亦同。	感謝委員提醒，已於稿件內修訂。

民國 101 年期初委員意見

審查意見	審查意見答覆與處理情形
1. 第 20 頁與第 25 頁所列驗證斷層類型不同，請修正。	本研究預計在本年度挑選一條其他**正斷層**(國內或國外活動斷層)的地表變形，運用數值分析所得的簡化圖或表，進行模式之驗證與應用。感謝委員提醒，矛盾之處已在工作計劃書中改正。
2. 在數值分析變形帶範圍時，建議將重點放在使用分離元素法(PFC)	感謝委員意見，經過第一年度的經驗，本年度將重點放在 PFC2D 的分析，因為 PFC 可以考慮多次斷層作用引致的生長地層及生長斷層現象。
3. 請考慮當山腳斷層錯動時，在台北盆地的年輕地層上可能的變形，例如：破裂面是否穿透地表、沉陷量可否達到５公尺等，是否可利用數值模擬來解釋這些現象。	一次岩盤錯動是否可以讓破裂延伸通過土壤到達地表，端視岩盤錯動量及土層厚度而定，此部份已有部份研究，可參考陳師賢(2007)之研究。就本研究之模式，岩盤錯動量等於地表沉陷量，所以岩盤如果一次錯動達 5m，地表也可沉陷達 5m，本研究應可模擬此一現象。
4. 本年研究山腳斷層，由於近一萬年無變動，其覆蓋層的厚度遠大於去年案例及國外正斷層研究者，應注意此事實的影響。	如果台北盆地是山腳斷層(正斷層)作用陷落而成，如此深厚的土層應是非常多次作用下所形成，因盆地間歇性的陷落與堆積，自然會有生長地層與生長斷層的特色，此一特性未來將會嘗試用 PFC2D 模擬分析之。
5. 山腳斷層於「現地調查」如何進行？報告中提及山腳斷層跡，是否真可見斷層跡？	● 關於現地調查的部份，第一是就既有地質鑽井剖面之現地踏勘，第二是選擇部份關鍵既有鑽井之岩心進行重新判識。 ● 岩盤斷層被土層所覆蓋，無法看見斷層跡，應該以**垂直投影地表土層推測斷層跡**取代。
6. 請考慮山腳斷層是否為單純的伸張(tension)作用亦或是有橫移(transtension)分量的作用？另外，砂箱離心試驗可否模擬橫移(transtension)作用?	● 關於山腳斷層是否為伸張或是亦有橫移作用，此一部份並非本研究之工作項目，如果有充份的地質證具指出山腳斷層為一伸張及橫移作用皆有的斷層，那本研究將在明年度研究橫移斷層時加以討論。 ● 模擬橫移作用之砂箱在 1g 的環境下是可以進行的，此亦為明年度之工作項目，但在離心機的環境下，目前還沒有足夠的技術可以進行。
7. 試驗結果對於砂、泥厚度宜標準化(Normalize)，以便後續應用。	斷層錯動時產生的變形範圍受土層厚度影響很大，當土層越厚時，變形範圍越大，但變形範圍內的應變量會越小。因此在未來的分析上，地表砂土層(或黏土層)之厚度會對總土層厚度做正規化。
8. 參考文獻應只列服務建議書中所引用者，部分誤植或漏列者(例:表 4-3、4-4)亦請補正。	感謝委員提醒，增列之參考文獻已中刪除。表 4-3、4-4 中所引用之參考文獻已在工作計劃書中補正。

民國 101 年期中委員意見

審查意見	審查意見答覆與處理情形
1. 報告內容豐富詳實，反應工作團隊的用心與努力；但是，主題似乎較為分散，可考慮將不同工作方法彙整並加以聚焦，在期末報告時加強重點之強調。	本年度之重點在於正斷層之研究，因此現地調查之重點是放在山腳斷層之野外調查、鑽孔資料整理及日本 411 地震之 Shionohira 斷層之挖溝剖面，砂箱實驗之重點則是在 1g 生長斷層之實驗結果整理及離心機正斷層實驗，數值模擬之重點是放在正斷層及生長斷層的砂箱實驗模擬上。為求研究結果之統一性，結論的部份有加上現地調查、砂箱實驗及數值模擬之結果比較。另外，上一年度之重點在於逆斷層之研究，但有一些去年未完成之工作也併在今年的工作報告裡，標題會註明是逆斷層之研究。
2. 正斷層之砂盒物理模型與數值模型於石油探勘與構造地質均有甚多之研究與參考文獻，建議可多蒐集參考。	感謝委員之建議，本研究已參考更多正斷層、生長斷層、三角剪切帶及砂箱實驗之文獻。 Rouby, D., Raillardb, S., Guillocheaua, F., Bouroullecc, R. & Nalpasa, T., (2002) Kinematics of a growth fault/raft system on the West African margin using 3-D restoration. Huang, S.Y., Charles, M.R., Chen, Y.G., Liu,H.C., (2007) Prehistoric earthquakes along the Shanchiao fault, Taipei Basin, northern Taiwan. Allmendinger, R.W., Shaw, J.H., (2000) Estimation of fault propagation distance from fold shape: Implications for earthquake hazard assessment. Nolleta, S., Vennekateb, G.J.K.,Gieseb, S., Vrolijkc, P., Uraia, J.L., Zieglerb, M., (2012) Localization patterns in sandbox-scale numerical experiments above a normal fault in basement.
3. 對於山腳斷層之模擬是否可考慮先有逆斷層之後再反轉為正斷層之模式。	這是一個很有創意的建議，唯本研究一開始即是分開對正斷層、逆斷層、平移斷層進行研究。為針對斷層錯動時覆土層之變形，僅考慮近期的斷層錯動形式，並且在模擬的過程中使用鑽孔資料整理出來的參數進行簡化土層簡化參數來當作覆土材料，因此在模擬山腳斷層的時已將它視為正斷層，也就是基於該地區已無逆斷層活動，且山腳斷層只有單一滑動面的假設在進行模擬。如果構造地質的研究有更進一步的證明的確有先逆斷層錯動後延著既有斷層面再反轉正斷層錯動，到時候將考慮研究反轉活動斷層對上覆土層變形的影響。
4. 台北盆地是個半地塹盆地，其邊界斷層-山腳斷層會有翻覆(rollover)的現象，斷層在地表附近雖為高角度傾斜，但往地下深處，斷層面傾斜會逐漸變緩，最後併入舊有之新莊斷層，除了期中報告所進行的	本研究為模擬正斷層錯動時覆土層錯動之情形，因此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

一般模擬外，建議可以進行此種模式的模擬。	的構造在模擬中皆視為基盤的一部份，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。
5. 可考透過比例理論分析，討論砂箱實驗在不同重力加速度下所代表之意義。	使用離心機進行砂箱實驗將模型材料之重力加速度增加 N 倍，則可將模型中每點的自重應力提高到與砂箱尺寸 N 倍之原型中相對應點之應力，詳見 2.3.2 小節。因此，以本研究中砂箱寬度為 1 公尺的情形下，10g、40g、80g 之離心機實驗代表了 10 公尺、40 公尺、80 公尺寬的現地情形。
6. 生長斷層的定義為一面沉積，斷層一面下陷，請考慮目前山腳斷層是否適用此定義？	本研究將山腳斷層視為生長斷層主要是因為由鑽孔資料整理出來的剖面有明顯的地層厚度在上下盤不一致的狀況，因此在砂箱實驗及數值模擬上仍是以一個生長斷層來看待，並且本研究是基於在一段時間內沉積作用先發生，然後斷層再活動造成地表變形的這個假設下在進行的。
7. 不同比例尺的圖資原本就有不同的誤差範圍，日本 411 地震斷層造成的破裂跡與圖資差 20 公尺，是否在其誤差容許範圍內？	在日本 411 地震過後，日本的研究人員現地調查發現在 Fukushima 地區有三條斷層再活動，其中 Itozawa 斷層分成東西兩條不同的斷層，兩條斷層相隔 2~3 公里，研究人員為便於分辨，稱 Itozawa 西斷層為 Shionohira 斷層。Shionohira 斷層在 411 地震之前因為地表變形速率太低(松田，1975)，所以常常被人忽略，然而在 411 地震之後因為其沿線的地表變形及機制為顯示為正斷層，所以引起日本研究人員的注意。
8. 日本 411 地震的破裂跡之間呈斜交關係，與山腳幾何形態似有差異；而且，日本 411 地震斷層兩側全為基盤，山腳斷層兩側一邊為基盤，一邊為巨厚沉積物，因此變形形態、範圍應與日本有所差異。美國 Utah 的 Wasatch 斷層與山腳斷層特性較為相似，建議加入美國的正斷層進行比較。	感謝委員之建議，本研究已參考更多正斷層、生長斷層之文獻。並在期末報告中加入美國新墨西哥之 Pajarito 斷層之文獻回顧。
9. 山腳斷層的土壤以黏土為主，而模型試驗以砂土為主，請注意兩者之間的差異與適用性問題。	黏土材料具有置立性，因此受到斷層作用時地表的變形容易出現陡峭的斷層崖，砂土材料因為沒有凝具力，所以斷層崖較緩，並且以去年的模擬結果可以看到剪切帶在砂土中比黏土中來的寬，以上這些都是覆土層性質不同時的差異。因為砂箱實驗中的黏土材料準備不易，本研究的正斷層砂箱實驗是以砂土材料為主，但也開始進行了的 2 組黏土砂箱實驗，詳見成果報告 3-2-2 小節。另外，今年度的正斷層數值模擬方面是以砂箱為模擬對象，所以也是以砂土為主，未來將會加入黏土的模擬。

民國 101 年期末委員意見

審查意見	審查意見答覆與處理情形
1. 試驗資料成果請依 normalized data 來處理。	委員的意見是很好的建議，本報告已有的成果會盡量以 normalized data 來呈現，如 3.2.1 小節第二段及圖 3-2-10 至圖 3-2-13 所呈現之結果。
2. 參數空間變異分析請考慮使用 semivariogram。	目前是用兩兩對比相關係數的方式表示。委員的建議是很好的方向，已著手進行，如有成果將於明年度之期中報告中呈現。
3. 請加強說明砂箱離心機試驗之設定（包括邊界條件等）。	詳見報告 2.3.2 小節，已詳列離心機試驗之試驗砂箱設計，包含砂箱尺寸、機械趨動設備、位移方向、最大位移量限制及不同加速度下(g 值)所代表之原型尺寸，另外也詳列試驗用砂土及黏土之性質。
4. 請說明斷層傾角變化（由小至大、由大至小）對地表變形的影響。	感謝委員給予的意見，已將斷層傾角變化對地表變形影響的比較新增至 3.3.2.Ⅱ小節。由比較結果可以得到斷層傾角對正斷層覆土中剪切帶之影響，當斷層傾角越小時剪切帶越寬，並越提早發展出反向斷層。
5. 現地觀察、砂箱試驗及數值模擬，除說明變形帶之發展外，亦請說明各個破裂面之發展，並指出主破裂面 0.。	感謝委員給予的意見，已修定報告，增加如何在現地觀察、砂箱試驗及數值模擬中觀察應變集中帶之發展的方法學，如第 2.5 小節。
6. 結構物補強減災方式請加強考慮主破裂面。	感謝委員給予的意見，已將結構物補強之模擬結果新增至 3.3.2.Ⅳ小節。
7. 山腳斷層係 transtension，請說明如何在 tension 試驗中探討 transtension 之地表變形。	Transtension 有橫移分量，是一 3D 問題，本計畫第三年度會針對橫移斷層進行相關研究。
8. 請檢視台北盆地之岩心，由不同深度之構造，了解山腳斷層之正斷作用在不同深度之應力狀況及變化。	委員之意見甚是，本研究透過岩心資料，整理了三腳斷層在基盤分佈的特性，詳細請見 3.1.1 小節。
9. 請收集全世界正斷層活動中，一次陷落最大為多少公尺？斷層傾角、地震規模及災害情況（包破結構物破壞型式）為何？並說明位在何種構造環境之正斷層。	根據 Wells 及 Coppersmith(1994)發表的歷史地震斷層的資料(詳見附錄)，加上我們收集到的在 1994 年以後至今的地震斷層的資料，得知歷史地震正斷層的最大錯動量約為 8 公尺左右，歷史地震斷層的最大錯移量則以橫移斷層的 12 公尺居冠。而歷史地震正斷層最大地震矩規模則為 7.6，歷史地震斷層的最大地震矩規模，還是以橫移斷層居冠，約為 8.6。 正斷層會形成於怎麼樣的地質環境，我們就大尺度和中尺度來說明，小尺度的正斷層基本上不會造成具破壞性的地震，先行忽略。就大尺度來看，正斷層常出現在受伸張的地殼大地構造環境裡，如地殼擴張的中洋脊附近，大陸地殼中的裂谷(rift)處、熱點(hotspots)所在的地區、弧後盆地(back-arc)等。就中尺度而言，如形成在大

	規模橫移斷層彎曲(bend)的伸張 duplex 處，亦即形成 transtension 的地區，這是因空間上的調協所造成，或是在大型的背斜構造的頂部，因岩石受撓曲所致。
10. 「整體構想」一節和工作計畫書相似，請依工作進展更新修正。	感謝委員提醒，已修正於期末報告中。
11. 封面格式請加入中程計畫名稱並統一格式。	感謝委員提醒，已修正於期末報告中。
12. p.18、19 有關日本 Fukushima 地區活動正斷層的描述與圖的編號有誤，請修正。	感謝委員提醒，已修正於期末報告中。
13. 圖 2-1-9~12 圖說中位置點標示於圖 2-1-3 有誤，請修正。	感謝委員提醒，已修正於期末報告中。
14. p.18 倒數第 5 行「兩斷層」所指為何，請說明。	「兩斷層」係指造成日本 411 地震的其中兩條斷層：Itozawa 東斷層及 Itozawa 西斷層，其位置請詳見圖 2-1-7。
15. p.113 法規整理建議加上法規最新修正日期。	感謝委員提醒，已修正於期末報告中。
16. p.113「山坡地開發建築管理辦法」已修改為「山坡地建築管理辦法」，原「山坡地開發建築管理辦法」條文內容已廢止。	感謝委員提醒，已修正於期末報告中。

民國 102 年期初委員意見

審查意見	審查意見答覆與處理情形
1. 研提之工作內容與方法具體可行，惟實體之介面條件應再加以說明。	感謝委員的提醒，但由於 1g 橫移斷層砂箱仍在設計及製作中，因此目前除了確定斷層傾角是 90 度以外，其它詳細的砂箱介面條件及試驗條件還無法在現在做說明。未來在期中及期末報告中有更詳細的說明。
2. 請蒐集米崙斷層沿線兩側微地形變化資料及地震斷層面解。	感謝委員的建議，雖然本研究重點在於斷層的影響範圍，並非微地形的調查，但本研究團隊也非常關切微地形變化的議題。舉例而言，在一條南北走向的左移橫移斷層上，其東北角及西南角會因為擠壓而隆起，而東南角及西北角會因為伸張而陷落，過去中研院也在花蓮北部地區佈設過水準網觀察過此現象。為了更了解米崙斷層的微地形，本研究團隊在去年也行文至 貴所取得米崙地區的 LiDAR 資料。另外，委員所提到的斷層面解也是一個很好的建議，本研究團隊將搜尋並收集前人研究是否有針對 1951 年之地震或其他地震所提出來的斷層面解，在期中及期末報告中有更詳細的整理。
3. 請蒐集美崙飯店開挖時之斷層資料。	非常感謝委員的意見，若能收集到美崙飯店開挖時所挖到之斷層資料，有助於本研究對於米崙斷層的了解。研究團隊將與林明聖教授或有關單位聯繫。
4. 山腳斷層為 transtension，米崙斷層為 transpression，彎曲的米崙斷層可否進行相關的模擬試驗？	由於實驗儀器之限制，模擬基盤的部份，本研究僅能進行直線型破裂的橫移斷層。根據過去數值模擬的經驗，雖然基盤是直線型，但經過橫移加擠壓的作用或橫移加伸張的作用，其覆土層中的斷層面會是一個曲面。而究竟在砂箱實驗中是否也會看到同樣的現象，必需等到本團隊完成橫移斷層的砂箱後方可進行實驗來驗證。未來將在期中與期末報告裡呈現更多結果。
5. 請注意砂箱試驗中之邊界效應，砂土試驗量可測應變分佈，黏土試驗量可測孔隙水壓分佈。	由於目前模擬黏土的材料是油黏土(甘油加黏土)，無法量測孔隙水壓。其模擬的情況是將地震視為一個快剪，因此以不排水剪力強度(S_u)來代表黏土的反應。
6. 建議增補國外相關案例，如土耳其 North Anatolian fault。	感謝委員的意見，由於土耳其 North Anatolian fault 長度超過 1000km，是一個很大的橫移斷層系統，由於本研究目前之重點擺在一個大的系統架構下，一條分支斷層，在某一次的錯動下會有什麼樣的影響範圍。因此，關於土耳其 North Anatolian fault 之案例探討將在期中與期末報告裡呈現更多結果。

7. 921 地震地表變形受近地表材料差異影響很大，不應只以豐原案例為證，建議將其他地點納入討論。	感謝委員的意見，影響土壤與結構物互制後變形的因子相當多，舉凡斷層種類，土層性質、土層厚度與結構物種類都會對土層變形及結構物變形有相當大的影響。然而本研究目前的成果以豐原案例為例，是因為在離心機的土壤與結構物互制實驗中已看到相當穩合的結果，也就是結構物與土層中之斷層線的相對位置影響很大，這個影響因子決定了在斷層錯動時哪些結構物會受影響而哪些不會。針對更多不同影響因子，本團隊也將更進一步更仔細的進行研究，在未來的報告裡呈現更多結果。
8. 計畫摘要之重點在今年度之研究，宜多加著墨。	感謝委員提醒，已於工作計畫書中修正。
9. 摘要部份僅列出第二年研究成果，請增列第一年之研究成果。	感謝委員提醒，已於工作計畫書中修正。
10. p.16-17 分年工作內容與預期成果中，100 年及 101 年之工作內容已完成，請更新資料。	感謝委員提醒，已於工作計畫書中修正。
11. p.17 有關 102 年度第 4 點，「進行前一年度逆斷層活動影響因子」,前一年度並非探討逆斷層，請修正。	感謝委員提醒，已於工作計畫書中修正。
12. p.24 「Landers 的地表變形」請改為「Landers 地震的地表變形」。	感謝委員提醒，已於工作計畫書中修正。
13. p.31「左移兼具分量的橫移斷層」請改為「左移兼具逆衝分量的橫移斷層」。	感謝委員提醒，已於工作計畫書中修正。
14. 請於計畫進行中，配合成果與經驗，檢視本所活動斷層地質敏感區劃定之原則和考量因子，並在理論與實務上提出建議。	根據本團隊截至目前的研究，不論是現地調查、砂箱實驗還是數值模擬的結果都指出，跟活動斷層的影響範圍最有關的參數就是土層厚度，因此，沿著斷層線每隔一段距離鑽探取得土層厚度有助於斷層地質敏感區的劃定，但要相隔多遠以及如何判定敏感區的範圍仍有很大的研究空間。實際的成果上，本團隊林銘郎教授也參與了車籠埔斷層地質敏感區域的劃定。未來本團隊也會繼續針對正斷層、橫移斷層進行更深入的研究。

民國 102 年期中委員意見

審查意見	審查意見答覆與處理情形
1. 本年度以橫移斷層系統為主，橫移斷層型態可能為直線，可能有彎曲(bend)或成雁形(jog)排列，其地表變形狀態均有不同，請說明米崙斷層之型態。	林啟文等(2009)年報告指出，由花蓮地區的干涉影像分析，米崙台地與與鄰近地區的活動特性不同，北埔線形有明顯的抬升，米崙台地的斷層均為左移斷層，研判北埔線形可能是米崙斷層伴生的斷層，由圖可知米崙斷層近地表為彎曲線形，並在美崙山中段分支出北埔線形，呈現馬尾狀的構造。
2. 請說明米崙山之形成與米崙斷層之關係。	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)。
3. 請蒐集美崙飯店開挖時之斷層資料。	計畫主持人已去函台北市立大學地球環境暨生物資源系林明聖教授，索取相關文獻。
4. 請參考屯子腳、新化及梅山斷層之資料，這 3 條斷層均有詳細記錄其變形狀況。	感謝委員之建議，已於期末報告中之 2.1.2 節加入文獻回顧。
5. 花崗國中校舍基礎開挖若有調查而未發現斷層通過，請在研究成果-「現地調查」章節中加以描述，以供後人參考。	計畫主持人已去函台大地質系陳文山教授，索取相關資料。
6. 簡報檔第 20 頁之地下斷層構造解釋需更謹慎，解釋時需有更多地質地形證據。	感謝委員提醒，已於期末簡報檔中修正。
7. 1972 年 AP Act 之觀點，請加強說明其內涵。	關於美國於 1972 年 AP Act 所提出之禁限建法規及相關說明已於本研究第二年度之期末報告(斷層近地表變形特性研究(2/4)，2012)中有詳列。本研究計畫第四年度之最終整合報告內也將附上相關整理。
8. 表 3.1.3 與 3.1.4 之 poisson ratio 過高，請再加以評估。	此處之 poisson ration 是依據彈性解之經驗公式求得。
9. 離心機試驗中黏土之 S_u 是一常數，此現象並不合理，請再加以評估。	試驗黏土之 S_u 隨深度增加而增加。
10. 試驗結果分析可參考塑性力學中 shear band、stress concentration、dilatancy 之相關理論。	參閱 White et al.(1994)所發表之 Effect of particle size on localization development in model test on sand 及 Stone and Wood(1992)所發表之 Effects of dilatancy and particle size observed in model tests on sands 等文獻分析結果顯示，若顆粒之平均粒徑大則會產生較寬之 shear band。本模擬分析之結果與文獻之結果吻合。

民國 102 年期末委員意見

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。

民國 103 年期初委員意見

審查意見	審查意見答覆與處理情形
1. 土壤的剪脹性建議可由 PFC 計算中求取。	感謝委員之意見,目前使用 PFC 模擬物理實驗及現地狀況之問題即是巨觀參數與微觀參數之間的轉換及比對。本研究雖無提供轉換公式,但過去三年來致力於數值模擬及物理實驗的比對,包含離心機砂箱實驗及砂土直剪實驗,目前已得到 Kn/Ks 及隨深度調整 Kn 之公式。而委員所提之砂土的剪脹性可以放在砂土直剪實驗的模擬繼續深入研究。
2. 建議於實驗時明確區分土壤排水強度參數 c'與不排水強度參數 S_u,在絕大多數情況下 c'應該趨近於 0。	感謝委員之意見,本研究團隊在期末報告中表示黏土強度時會改以不排水剪力強度做為依據。
3. 在建立土壤行為與地表斷裂關係時,建議使用土壤勁度指數(rigidity index)做為砂土與黏土行為之指標。	感謝委員之意見,本研究團隊在期末報告中整理資料時會盡量以土壤勁度指數作為指標。
4. 砂箱實驗及數值分析建議附上實驗參數矩陣表,以提供簡易明確之實驗介面條件。	感謝委員之意見,已於工作計劃書中 3.3.1 小節中加入參數矩陣。
5. 請考慮不同覆土厚度對變形帶之影響。	感謝委員之意見,本研究今年度將在數值模擬中加入改變土層厚度的敏感度分析,藉此求取不同覆土厚度對變形帶之影響。
6. 請增加世界地震斷層的變形資料,可作為研究成果之對比與驗證。	感謝委員之意見,未來將補充地震斷層的變形資料。
7. 世界地震斷層的變形資料,橫移斷層的部份建議可參考中國大陸的資料。	感謝委員之意見,本研究的橫移斷層參考資料會以美國的 Hayward Fault 及台灣的米崙斷層做為主要依據。因此尚不考量其他的橫移斷層。
8. 計畫執行方法及進行步驟章節中,請加強各類型斷層活動影響寬度之作法和預期成果。	感謝委員之意見,已於工作計劃書中 3.3.2 小節中加入預期成果。

民國 103 年期中委員意見

審查意見	審查意見答覆與處理情形
1. 車籠埔斷層地表變形之多樣性請詳加說明。	感謝委員之意見，已於本報告第三章，3.1.1 節中加入說明。
2. 針對車籠埔斷層已有之槽溝文獻整理有關上覆土層變形情形，並針對竹山槽溝剖面說明其上覆土層變形狀況。	感謝委員之意見，已於本報告第三章，3.1.1 節中加入說明。
3. 請透過竹山槽溝剖面重建斷層之三維形貌。	感謝委員之意見，已於本報告第三章加入(圖 3.3.6)。
4. 車籠埔斷層非一直線，有轉彎等應力集中現象，請考慮竹山槽溝是否能代表車籠埔斷層。	現地之斷層不論是覆土層地表出露的位置或是在岩盤中之破裂面都不會是一條直線或一個平面。一個槽溝當然無法代表整條斷層沿線的變形行為，但是由於竹山槽溝之剖面清楚，而且本研究搜集到多期的槽溝剖面，因此不論是分析或比對都以竹山槽溝為主。再者，本研究之最重要的方向是覆土層中的影響範圍，所以雖然砂箱實驗是 3D 進行，但在分析上仍是以 2D 為主，而數值模擬更是在 2D 中進行，在 2D 中分析。因此，本研究之重點並非在於竹山槽溝是否可以代表車籠埔斷層，乃在於研究方法及分析方式可以適用於上覆土層的影響範圍之決定。
5. 斷層非一直線，請考慮實驗所做的結果能否代表三種形式(正斷層、逆斷層、橫移斷)之地表變形。	現地之斷層不論是覆土層地表出露的位置或是在岩盤中之破裂面都不會是一條直線或一個平面，然而在進行覆土層之影響範圍的研究時，不論是砂箱實驗或是數值模擬，簡化問題是有必有的，因此，為了使砂箱實驗或數值模擬做出來的成果有實際的對象可以比對，本研究在逆斷層的部份皆以車籠埔斷層的竹山溝為模擬對象，而正斷層的部份則是以山腳斷層的五股剖面為模擬對象。一個槽溝或是鑽井的剖面當然無法代表整條斷層沿線的變形行為，但是若比對順利，則本研究之研究方法適合套用在更多的對象上，甚至未來可以發展成 3D 模擬的方式來做更進一步的模擬。
6. 後續研究在砂箱或 PFC 可考慮斜滑移之介面條件。	在數值模擬中雖可加入斜滑移之介面條件，但本研究砂箱實驗所使用之砂箱無法進行斜滑移之實驗，因此，在考量簡化斷層各種因素的情況下，本研究不會進行斜滑移的數值模擬，僅

	針對正、逆及橫移斷層進行數值模擬。
7. 砂箱模擬試驗，先抬升再橫移之模型宜透過橫剖面釐清 Riedel Shear 或花狀況構造之發育狀況。	感謝委員之意見，本研究針對橫移斷層之砂箱試驗已有切剖面，觀察覆土層中之花狀構造的發展，於本報告第三章，3.2.1 小節中說明。
8. 在斷層與結構物互制的部分建議增加現地尺度數值模擬。	這部份需要結構物設計的相關參數，因為無法取得特定案例的相關參數，故以文獻回顧的方式進行。
9. 地表覆蓋層的物理性質與其含水量、地下水面的高低有密切關係，而實驗材料皆使用乾性材料，建議針對實驗材料含水量的不同與實驗結果的影響進行評估。	雖然黏土的受力變形行為受有效應力控制，但在快速剪動下，一般認為是可以用不排水剪力強度($\emptyset = 0$)與變形行為分析，本研究採用此一精神。另外，因為黏土的不排水剪力強度與黏土的含水量相關，本研究是用不同的甘油/皂土比產製不同強度的模擬試體來類比。而現地地下水升升降降，影響土壤強度，因地而異，如果要分析真實特定案例，應採用真實案例之含水量與強度進行相關分析。
10. 在斷層危害度分析方面請交代分析用斷層參數、斷層的地震模擬分布、斷層位移衰減式及分析不同斷層距離下的位移值。	感謝委員之意見，已於本報告第三章，3.1.2 小節中加入說明。
11. 四年期總報告部分建議在第一章針對斷層變形帶斷層與結構物互制方面做文獻回顧，並詳實呈現於報告書中。	感謝委員之意見，已於四年期總報告第二章加入此一部份的文獻整理成果。
12. 四年總報告部分建議增加討論章節，深入討論實驗與模擬成果、斷層位移危害度及斷層與結構物互制，並對其在敏感區劃設、地質調查成果審查之應用多做說明。	感謝委員之意見，已於四年期總報告第七章加入此一部份的文獻整理成果。

民國 103 年期末委員意見

審查意見	審查意見答覆與處理情形
10. 結論所提出的斷層變形影響範圍建議值之評估方式，建議以國際案例資料及車籠埔斷層實測資料做驗證，並探討其不確定性，以提供劃設活動斷層地質敏感區之參考。	本研究提出之斷層影響範圍之公式指出，影響範圍與斷層之錯動量及覆土厚度有很大的關係。因此，雖然斷層之錯動量可以查表得知，但斷層沿線之覆土厚度仍需靠鑽探資料來提供，國外之文獻雖有提到影響範圍，但沒有明確的覆土厚度，因此無法進行驗證。車籠埔斷層的部份，則有賴後續研究工作針對槽溝或鑽探資料取得沿線土層厚度，方能進行進一步驗證。
11. 斷層發生通常會形成斷層帶，以主斷層進行模擬是否能代表斷層帶之變形，建議加以討論。	感謝委員之提問，地震斷層造成之地表破裂常常因現地地質、地形、建築物…等條件而有所不同，不同研究依據現地調查的結果也有不同的分類，例如在豐原中正公原除了有主斷層變形帶之外，也有反向斷層之變形帶。本研究進行了各類數值模擬之後，也有觀察到如同以上之現象在其中，而為了提出合理的斷層影響範圍，本研究所建議之逆正斷層之影響範圍公式及圖表乃是考量最大影響範圍，即含蓋所有模擬結果之最大影響範圍。
12. 本報告有關橫移斷層的砂箱實驗，主要呈現為壓縮性的正向開花構造，若能進一步探討橫移伸張性負向開花構造，可會更全面性瞭解橫移斷層變形的特性。	感謝委員提問，本研究進行橫移斷層之砂箱實驗之外盒受限於無法調整為壓縮或伸張之環境，因此嘗試以不同的砂土密度來模擬出壓縮或伸張的花狀構造，但幾經降低砂土密度，仍無法看出伸張性的花狀構造。
13. 竹山槽溝上覆層以細粒材料為主，且凝聚力（cohesion）較佳，但濁水溪附近及烏溪附近上覆層以大礫石為主，其變形範圍及型態明顯與竹山不同，宜加考量。	感謝委員的提問，斷層經過黏土質覆土層或砂土質覆土層之影響範圍會有不一樣的結果，在現地調查中可以看到，在本研究所進行的離心機實驗結果中也可以看到。唯本年度之研究重點在於提出斷層對上覆土層可能造成的影響範圍，因此本研究所建議之逆正斷層之影響範圍公式及圖表乃是考量最大影響範圍，故無法一一針對現地不同情況進行分析。
14. 山腳斷層為第二類活斷層，應特別強調，並請以地調所公佈之長度為依據。加長部分請說明如何估算出 73km，以免外界產生誤解。	感謝委員之建議，已於定稿報告中 4.2 小節加以說明。
15. 3.1.2 機率式地震危害度分析一節，宜對方法學及參數的採用進行較詳細的說明。	感謝委員之建議，已於定稿報告中增加此一方法學的說明。

16. 引用之圖表均需加註資料來源。	感謝委員提醒，已於定稿報告中加以修正。
17. 本年度工作內容有七大項（p.7），目前報告之內容不易反應出各大項之工作成果，建議可考慮配合項目重新調整報告內容。	感謝委員之建議，已於定稿報告中加以修正。
18. 總報告應有包括全期計畫成果之總節摘要（summary），目前之摘要太過簡略。	感謝委員之建議，已於總報告定稿中增加長摘要。
19. 試驗原始資料應以光碟送地調所留存，並於一定時間內暫不公開。	感謝委員之提醒，試驗之原始資料光碟將會與定稿報告一同繳交。
20. 請將蒐集的國內外文獻電子檔提供給地調所參考。	感謝委員之提醒，國內外文獻電子檔光砂將會與定稿報告一同繳交。

計畫主要績效指標 (KPI)

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(100~103 年)

績效指標	初級產出量化值
學術成就	
論文	篇名
國際期刊	1. Baziar, M. H., Ali, N., Lee, C. J. and Hung, W. Y. (2014), Centrifuge modeling of interaction between reverse faulting and tunnel. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volume 65, October 2014, Pages 151–164. 2. Chang, Y.Y., Lee, C.J., Huang, W.C., Huang, W.J., Lin, M.L., Hung, W.Y., 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, Vol. 11, No.2, pp.79-88. 3. Chang, Y.Y., Lee, C.J., Huang, W.C., Hung, W.Y., Huang, W.J., Lin, M.L., Chen, Y.H. (2015), Evolution of the surface deformation profile and subsurface distortion zone during reverse faulting through overburden sand, Engineering Geology, Vol. 184, pp. 52-70. 4. Chu, S.S., Lin, M.L., Hung, W.C., Liu, H.C., Chan, P.C. (2013), Laboratory Simulation of Shear Band Development in a Growth Normal Fault, Journal of GeoEngineering, Vol. 8, pp. 19-26. 5. Chu, S.S., Lin, M.L., W.C., Hung, Nien W.T., Liu, H.C., Chan, P.C. (2015), Simulation of growth normal fault sandbox tests using the 2D discrete element method, Computers & Geosciences, Vol 74, Pages 1-12. 6. Huang, W. C., Sung, C. Y., Liao, H. Y. and Chu, S. S. (2015), Micromechanical behavior of granular materials in direct shear modeling, Journal of the Chinese Institute of Engineers (accepted)
國內期刊	1. 洪汶宜、李崇正、黃文昭、張有毅、黃文正、林銘郎、林燕慧(2014)，以離心模型試驗探討正逆斷層引致的地表變形與剪裂帶發展，經濟部中央地質調查所特刊 2. 蔡家民、黃文正、詹佩臻、盧詩丁(2014)，山腳斷層再活動對大台北地區地變、淹水災害及鄰近斷層觸動之探討。經濟部中央地質調查所特刊。(已接受)
國際研討會	1. Chan, P.C., Chu, S.S., Chen, T.W., Lin, M.L., Liu, H.C. (2011). Deformation of overburden soil from the evolution of normal faulting - case study of Shanchiao Fault in Taipei Basin. The Twenty-Fourth KKCNN Symposium on Civil Engineering, Hyogo, Japan, December 14-16, p419-422. 2. Chan, P.C., Chu, S.S., Lin, M.L. (2014). Analytic Study of Three-Dimensional Rupture Propagation in Strike-Slip Faulting with Analogue Models. European Geosciences Union, General Assembly 2014, Vol. 16, EGU2014-9854, Vienna, Austria. 3. Chan, P.C., Chu, S.S., Nien, W.T., Huang, W.C., Lin, M.L. (2013). Evolution of overburden soil deformation by oblique-slip faulting: insights from analogue and numerical models. American Geophysical Union's 46th annual Fall Meeting, AGU T43A-2640, San Francisco, America. 4. Chang, Y.Y., Lee ,C.J., Huang, W.C., Hung, W.Y., Huang, W.J., Lin, M.L., Lin, Y.H. (2014). Use of Centrifuge Modeling and PFC^{2D} Simulation to Evaluate the Surface and Subsurface

	Deformation Profiles Induced by Reverse Faulting. The 5th Asia Conference on Earthquake Engineering October 16-18, 2014. 5. Chang, Y.Y., Lee, C.J., Huang, W.C., Huang, W.J., Hung W.Y. (2012). A study on the characteristic of the ground surface deformation induced by the reverse fault slip. International Conference on Civil and Environmental Engineering, ICCEE-2012, Aug. 17-18, 2012, Hiroshima University 6. Chang, Y.Y., Lee, C.J., Huang, W.C., 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. 7. Chang, Y.Y., Lee, C.J., Hung, W.Y., Chen, T., Tsai, C.H., 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, September 17-18, Jhongli, Taiwan. pp.72-78. 8. Huang, I.J., Huang, W.J., Lee, J.C. (2013). Study of the relationship between Surface Rupture and Faulting due to 2010 M6.4 Jiashian Earthquake. AGU2013 T51C-2484. 9. Huang, W.K., Lee, C.F., Wei, L.W, Chou, H.T., Chu, S.S. (2013). DEM simulation for landslide process and barrier dam formation on the mountainous highway, EGU General Assembly Conference Vol. 15, EGU2013-7499. 10. Lyu, J.Y., Zhang, T.J., Lee, C.J., Lin M.L. (2014). Surface Affected Zone Due to Bonded Overburden Soil on Normal Faulting by Distinct Element Method and Centrifuge Modeling. The 27th KKHTCNN Symposium on Civil Engineering, G-5, Nov., 10-12, 2014. 11. Huang, W. C., Sung, C. Y. and Liao, H. Y. (2012), Direct Shear Test Modeling of Granular Material from a Microscopic Point of View. International Conference on Civil and Environmental Engineering, ICCEE-2012, Hiroshima University, Hiroshima City, Japan.
國內研討會	1. 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。 2. 林銘郎、李崇正、黃文正、黃文昭、詹佩臻、粘為東、林燕慧、盧詩丁 (2012) 斷層近地表變形與工程特性探討，經濟部中央地質調查所，「大台北地區防災地質研討會」，101 年 09 月 13-14 日。 3. 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。 4. 洪汶宜、張有毅、陳婷、涂亦峻、李崇正、黃文昭、黃文正、林銘郎、林燕慧 (2013)，「逆斷層引致近之地表變形之離心模型與數值分析研究 」，海峽兩岸地工技術/岩土工程交流研討會，11 月 5-7 日，台北，台灣。 5. 洪汶宜、張有毅、陳婷、涂亦峻、李崇正、黃文昭、黃文正、林銘郎、林燕慧 (2013)，「逆斷層引致近地表變形之離心模型模擬」，第十五屆大地工程學術研究討論會，9 月 11-13 日，雲林，台灣。 6. 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，paper No. 11009，pp.1-10。 7. 粘為東、林銘郎 (2012)以 PFC 顆粒力學分析斷層生長地層之變形，力學年會暨第 36 屆全國力學會議，中央大學，21012 年 11 月 16~17 日，p77。 8. 許劭禎、黃文正 (2013)，利用鑽井資料來探討臺北盆地的地質

	特徵。2013 年地球科學聯合學術研討會，T2-P-13。 9. 黃意茹、黃文正 (2013)，探討甲仙地震之地表裂隙與盲斷層之關係。2013 年地球科學聯合學術研討會，T1-P-10。 10. 詹佩臻、林銘郎、李崇正、黃文昭、黃文正 、盧詩丁、林燕慧、劉桓吉 (2011) 斷層活動影響範圍之探討，2011 臺灣活動斷層與地震災害論文集，44-65。 11. 詹佩臻、林銘郎、劉桓吉 (2013) 橫移斷層引致近地表變形特徵之砂箱試驗及數值模擬討論，中華民國地質學會與中華民國地球物理學會，102 年年會暨學術研討會，龍潭，102 年 5 月 13~17 日、論文集-ST-1B-08。 12. 詹佩臻、林銘郎、劉桓吉（2014）橫移斷層引致近地表變形行為之室內砂箱試驗，中華民國地質學會與中華民國地球物理學會，103 年年會暨學術研討會，花蓮，103 年 5 月 14~16 日、論文集，299-300。 13. 詹佩臻、林銘郎、劉桓吉、林燕慧 (2012) 由鑽井岩心探討山腳斷層南段正斷層分段排列的陷落型態，中華民國地質學會與中華民國地球物理學會，101 年年會暨學術研討會，論文集-1-3-S135-NH2-1，中央大學，101 年 5 月 17~18 日，p149。 14. 詹佩臻、劉桓吉、林銘郎、盧詩丁、林燕慧 (2012) 台北盆地西緣之斷層-成子寮斷層，經濟部中央地質調查所，「大台北地區防災地質研討會」，101 年 09 月 13-14 日。 15. 蔡家民、黃文正 (2013)，山腳斷層再活動於台北區域之影響。2013 年地球科學聯合學術研討會，T1-P-11。 16. 廖泓韻、宋丘言、黃文昭 (2013)，使用離散元素法進行乾砂直剪試驗模擬，第十五屆大地工程學術研討會，中華民國 102 年 9 月 11-13 日，雲林，台灣
博碩士培育	論文名稱
博士	1. Chang, Y.Y. (2013). Use of Centrifuge Modeling and Distinct Element Method to Evaluate the Surface and Subsurface Deformation of Normal Faulting and Reverse Faulting Ph. D Dissertation National Central University, Taiwan. 2. 朱聖心 (2014)，生長正斷層錯動引致覆土層剪切帶發展之研究，國立台灣大學土木工程研究所博士論文，臺北。
碩士	1. 張庭傑 (2014)，以離心模型模擬正斷層及逆斷層通過複合土層引致的地表變形特性，國立中央大學土木工程系碩士論文，中壢。 2. 許劭禎 (2013)，利用鑽井資料建構臺北盆地第三紀之地層與構造，國立中央大學地球科學系碩士論文，中壢。 3. 陳榮華 (2013)，以離心模型模擬正斷層及逆斷層通過黏土地層引致的地表變形特性，國立中央大學土木工程系碩士論文，中壢。 4. 黃意茹 (2013)，探討甲仙地震之地表破壞與觸發斷層之關係，國立中央大學地球科學系碩士論文，中壢。 5. 廖奕易 (2013)，以離心模型試驗模擬逆斷層錯動近地表變形特性，國立中央大學土木工程系碩士論文，中壢。 6. 蔡家民 (2014)，山腳斷層再活動對大台北地區地形變化及相鄰斷層庫倫應力之探討，國立中央大學地球科學系碩士論文，中壢。 7. 宋丘言 (2012)，使用離散元素法進行乾砂直剪試驗模擬，國立中央大學碩士論文，國立中央大學土木工程系碩士論文，中壢。 8. 廖泓韻 (2013)，以微觀角度探討顆粒狀材料在直剪試驗下之力學行為，國立中央大學碩士論文，國立中央大學土木工程系碩士論文，中壢。 9. 林郁鈞 (2014)，以離散元素法進行具鍵結顆粒材料之直剪試驗模擬，國立中央大學碩士論文，國立中央大學土木工程系碩士論文，中壢。