

國 立 中 央 大 學

應 用 地 質 研 究 所
碩 士 論 文

藉離散元素法探討竹山槽溝中斷層引致褶
皺之構造演育

**Evolution of fault-induced fold at Chushan
excavation site, central Taiwan, derived from
numerical analysis of PFC simulations**

研 究 生：徐家祥

指 導 教 授：黃文正

中 華 民 國 一百零五 年 六 月



國立中央大學圖書館 碩博士論文電子檔授權書

(104年5月最新修正版)

本授權書授權本人撰寫之碩/博士學位論文全文電子檔(不包含紙本、詳備註1說明)，在「國立中央大學圖書館博碩士論文系統」。(以下請擇一勾選)

同意 (立即開放)

同意 (請於西元 _____年_____月_____日開放)

不同意，原因是：_____

在國家圖書館「臺灣博碩士論文知識加值系統」

同意 (立即開放)

同意 (請於西元 _____年_____月_____日開放)

不同意，原因是：_____

以非專屬、無償授權國立中央大學、台灣聯合大學系統圖書館與國家圖書館，基於推動「資源共享、互惠合作」之理念，於回饋社會與學術研究之目的，得不限地域、時間與次數，以紙本、微縮、光碟及其它各種方法將上列論文收錄、重製、與利用，並得將數位化之上列論文與論文電子檔以上載網路方式，提供讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印。

研究生簽名: 張家祥 學號: 102624005
論文名稱: 藉離散元素法探討竹山槽溝中斷層引致褶皺之構造演育

指導教授姓名: 黃文正

系所 : 應用地質 所 **博士班** **碩士班**

填單日期: 105/7/22

備註 :

1. 本授權書之授權範圍僅限**電子檔**，紙本論文部分依著作權法第15條第3款之規定，採推定原則即預設同意圖書館得公開上架閱覽，如您有申請專利或投稿等考量，不同意紙本上架陳列，須另行加填申請書，詳細說明與紙本申請書下載請至本館數位博碩論文網頁。
2. 本授權書請填寫並**親筆**簽名後，裝訂於各紙本論文封面後之次頁（全文電子檔內之授權書簽名，可用電腦打字代替）。
3. 讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印上列論文，應遵守著作權法規定。

國立中央大學碩士班研究生
論文指導教授推薦書

應用地質 學系/研究所 徐家祥 研究生所提
之論文藉離散元素法探討竹山槽溝中斷層引致褶皺
之構造演育 係由本人指導撰述，同意提付審查。

指導教授 蔡文正 (簽章)

105 年 6 月 7 日

國立中央大學碩士班研究生
論文口試委員審定書

應用地質 學系/研究所 徐家祥 研究生
所提之論文
藉離散元素法探討竹山槽溝中斷層引致褶皺之構
造演育 經本委員會審議，認定符合碩士資格標準。

學位考試委員會召集人

黃文昭

委

員

張有毅

楊志成

黃文正

中華民國 一零五年 六月七日

101.06.15

藉離散元素法探討竹山槽溝中斷層引致褶皺之構造演育

摘要

竹山槽溝總長 40 公尺，深 10 公尺，橫跨於 1999 年集集地震引致的兩公尺高的地形崖上，其長軸方向的兩個主要牆面，分別以南牆與北牆稱之。在南牆上，分支斷層沿褶皺背斜軸跡截切，截切傾角為 32 度，且截切的最大錯距約為 4.2 公尺；在北牆上，分支斷層沿著褶皺向斜軸跡截切，斷層傾角為 24 度，且最大錯距約為 3.0 公尺，然而兩牆只相距十四公尺。本研究的目的即在於以離散元素法，藉由已知的地質條件，設計類似基盤斷層作用 (i.e. basement faulting or forced folding) 的模型，探討兩牆構造演育發生變化前，形成純單斜構造的地質條件，再初步探討短造成距離下兩牆面構造變化的可能原因。本研究使用以離散元素法為基礎的 Particle Flow Code (PFC) 程式，將模擬對象假設由圓形剛體顆粒 (particle) 與不同的鍵結模式 (bond model) 組成。由於 PFC 的設定參數非直接的地質材料力學參數值，須先進行 PFC 直剪盒及雙軸試驗模擬，以得出相對應的參數值。基於槽溝土層力學特性，以及槽溝附近的鑽井資料，竹山槽溝的模型由兩層力學特性不同的覆土層組成，上層為七公尺厚的黏土層，下層由八到十五公尺厚的礫石層組成。結果顯示，在垂直錯距為 3.6 公尺的下，斷層傾角必須大於 24 度，且黏土層的凝聚力強度在 11~12 kPa 能形成單斜構造。本

研究進一步發現，兩槽溝剖面的構造差異，可能是由於主控斷層傾角的側向變化，在兩剖面下有所不同所造成。當凝聚力為 11 kPa，下伏斷層角度為 24 度時，黏土層形成單斜構造，而礫石層形成楔形狀突入黏土層並截切黏土層褶皺的背斜軸處，與現今在南牆上看到的構造相同；當下伏斷層角度為 32 度時，黏土層同樣形成單斜構造，此時褶皺的背斜軸處受到截切，與現今槽溝中南牆的構造剖面相似。

關鍵字:竹山槽溝、斷層引致褶皺、構造演育、離散元素法、PFC2D 數值模型

Evolution of fault-induced fold at Chushan excavation site, central Taiwan, derived from numerical analysis of PFC simulations

ABSTRACT

Exposures in the Chushan trench were 40 m long and 10 m deep, excavated across a 1999 earthquake-induced escarpment of 2 m high. There were two main structure profiles, called north wall and south wall. On south wall the fold was truncated through along the axial trace of its anticline by a fault branch with a dip angle of 32 degrees and a maximum separation of 4.2 m while on the north wall the steep limb of the fold was displaced up to 3.0 m along the axial trace of its syncline by another fault branch with a dip angle of 24 degrees. The distance between two walls was only 14 m. This study intends to explore the geometerail condition of the site when the site fromed the pure monocline which is before the heterogeneous structure and explore how this heterogeneous structure might form using distinct element simulation of basement faulting. This study uses Particle Flow Code (PFC) based on discrete element method, regarding material as assembled rigid particles. The rigid particles can be connected by two types of bond models. Because the PFC parameters are different from geomaterial mechanic properties, we cannot directly use the values of geomaterial mechanic properties. In order to attain the values of PFC parameters equailvent to the mechanic properties. PFC simulations of direct shear test and bilateral test are perfomed. All our models consist of two mechanical layers, including an upper clayey layer of 7 meters thick and a lower gravelly layer of 8-15 meters thick, as

revealed by the excavation, a borehole nearby and soil tests. At the vertical displacement of 3.6 meters, Our results show that the monocline fold can be simulated by a low-angle reverse faulting similar to a subsurface dominant fault with a dip angle of 24 degrees derived from the trench site at the ground surface and in a borehole in the hanging wall, and the monocline structure can only generate when the cohesion of the clay layer is 11~12 kPa. Furthermore, the different structures on the two exposures were mainly controlled by the dip-angle variation of the upper part of the subsurface dominant fault. The simulation of reverse faulting with a dip angle of 24 degrees shows a monocline forms in the clayey layer, and then a gravelly wedge starts to protrude into the clayey layer and displace it along the axial trace of the syncline similar to the structure on the north wall, and the simulation of reverse faulting with a dip angle of 32 degrees shows a monocline forms in the clayey layer, and then this monoclonal clayey layer starts to be displaced along the axial trace of the anticline similar to the structure on the southern exposure.

Key words: Chushan excavation, fold induced by fault, structural evolution, district element method, PFC2D model.

致謝

這篇論文能順利完成，首先要感謝黃文正老師對學生的指導。學生鴻鈍，在學識與能力方面有許多不足，承蒙老師再三提攜與教育。再來要感謝張有毅博士的指導，在學習如何撰寫程式、校正參數上獲得學長幫助，若沒有學長的細心指導，學生至今仍無法有所突破。感謝粘為東學長、林郁鈞學長、盧育誠學長、許博皓的教學與討論，增進我不足的知識和解決我在土木工程上的疑慮與問題。感謝地質力學研究室的學長姐與學弟妹的幫助，有奕維、書睿、承恩的幫忙讓我在研究的過程中變得更加順遂。感謝尤芊翔在研究生涯的討論與勉勵，我們都在這段期間尋找自己想要的生活。在研究過程中遭遇許多挫折，有過不少沮喪的時候，感謝 18 在我迷惘的時候的鼓勵與開導；感謝《地科院中東巴基斯坦》的成員們無論在任何環境下都能開心的打鬧；感謝涂佑霖、俊榮、緊哥、王維、飛飛、宛庭、芷薇以及各實驗室的幫助。感謝所有提供知識、技術、鼓勵我的人們，因為有你們，這篇論文才能完成。

目錄

摘要	i
ABSTRACT	iii
致謝	v
目錄	vi
圖目錄	viii
表目錄	xi
符號說明	xii
第一章 緒論	1
第二章 竹山槽溝介紹	10
2.1 車籠埔斷層特性與竹山槽溝介紹	10
2.2 沉積單元層與力學單元層之關係	16
2.3 竹山槽溝剖面構造演化	23
第三章 研究方法	26
3.1 離散元素法	26
3.2 力學試驗與 PFC ^{2D} 模擬方法	37
3.2.1 直剪盒試驗與模擬方法	47
3.2.2 雙軸試驗與模擬方法	58

第四章 PFC ^{2D} 模擬力學參數結果.....	62
4.1 直剪盒模擬試驗.....	62
4.2 雙軸模擬試驗.....	69
第五章 竹山槽溝構造模擬結果.....	77
5.1 模型設置.....	78
5.2 黏土層凝聚力、覆土層厚度、斷層角度變化模擬結果	82
第六章 討論.....	86
6.1 黏土層凝聚力、覆土層厚度、斷層角度變化之影響	86
6.2 模擬結果與現今竹山槽溝結果比較.....	93
第七章 結論.....	101
參考文獻.....	103
附錄	108

圖目錄

圖 1.1 汶川地震沿線破裂形貌	6
圖 1.2 調查之車籠埔斷層沿線破裂形貌.....	6
圖 1.3 霧峰鳳梨園槽溝	7
圖 1.4 霧峰烏溪北岸槽溝	8
圖 1.5 竹山槽溝南北兩牆剖面圖	9
圖 2.1 竹山槽溝位置、以及相鄰斷層位置	13
圖 2.2 竹山槽溝北牆剖面	14
圖 2.3 竹山槽溝南牆牆面與其構造剖面	15
圖 2.4 竹山槽溝之沉積單元	20
圖 2.5 各沉積單元土壤分類之結果	21
圖 2.6 竹山槽溝兩鑽井資料與深部斷層位置圖	22
圖 2.7 竹山槽溝回推剖面	25
圖 3.1 離散元素法時間計算循環	33
圖 3.2 重疊量示意圖	34
圖 3.3 接觸鍵結示意圖	35
圖 3.4 接觸鍵結沿著顆粒表面移動而不破裂	35
圖 3.5 接觸鍵結所能承受之張力與剪力門檻值	36
圖 3.6 研究流程圖	46

圖 3.7 乾砂直剪試驗結果	53
圖 3.8 各點為不同正向應力下最大剪應力值，虛線為破壞包絡線	53
圖 3.9 加長直剪盒長度，剪應力到達峰值時結果	54
圖 3.10 加高直剪盒	55
圖 3.11 上下盒應力分佈、監測位置以及上下盒破壞凝聚力之結果	56
圖 3.12 直剪盒試驗模型裝置	57
圖 3.13 雙軸試驗模型與結果示意圖	61
圖 3.14 雙軸試驗軸向應力與軸線應變曲線圖	61
圖 4.1 直剪盒裝置設定	67
圖 4.2 各鍵結強度結果	68
圖 4.3 碾石層直剪試驗結果	68
圖 4.4 裝置大小為 15X7.5CM 碾石層顆粒參數下	74
圖 4.5 粉砂質黏土層雙軸試驗模型與結果示意圖	74
圖 4.6 黏土層與碾石層裝置大小、力學條件示意圖	75
圖 4.7 粉砂質黏土層雙軸試驗結果	76
圖 4.8 碾石層雙軸試驗結果	76
圖 5.1 斷層模擬模型設置圖	81
圖 5.2 凝聚力 12 kPa，變化斷層角度與深度結果	83
圖 5.3 凝聚力 35.4 kPa，變化斷層角度與深度結果	84

圖 5.4 凝聚力 63.1 kPa，變化斷層角度與深度結果.....	85
圖 6.1 覆土層厚度從 8 公尺、15 公尺、22 公尺下結果.....	90
圖 6.2 垂直抬升量增加後剪應變變化.....	91
圖 6.3 斷層角度 20 度、30 度、60 度的應變變化.....	92
圖 6.4 斷層角度 22~32 度的結果.....	96
圖 6.5 主斷層角度為 24 度與 32 度之結果.....	97
圖 6.6 模擬結果與現今構造剖面比較	98
圖 6.7 斷層角度在 24 度下，斷層演育至垂直錯距 3.6 公尺之結果.....	99
圖 6.8 斷層角度為 32 度下	100

表目錄

表 3.1 各岩性資料收集彙整結果.....	44
表 3.2 黏土層與礫石層資料蒐集結果	44
表 3.3 竹山槽溝沉積單元的粒徑大小	45
表 4.2 為接觸鍵結 50~300 N 的結果	63
表 4.1 PFC ^{2D} 所輸入之微觀參數	65
表 4.2 模擬之黏土層力學參數與實際參數比較	65
表 4.3 模擬之礫石層力學參數與實際參數比較	66
表 4.5 模擬黏土層與實際黏土層的楊氏係數、泊松比	73
表 4.6 模擬礫石層與實際礫石層的楊氏係數、泊松比	73

符號說明

符號 說明

F_i^n 在時階 i 下的正向應力，單位為 N

K^n PFC^{2D} 中顆粒正向勁度，單位為 N/m

K^s PFC^{2D} 中顆粒切向勁度，單位為 N/m

ρ 顆粒密度，單位為 kg/m³

P 正向壓力，單位為 Pa

g 重力，單位為 m/s²

H 試體厚度，單位為 m

U^n PFC^{2D} 中顆粒與顆粒間的重疊量，單位為 m

τ 剪向應力，單位為 Pa

σ_n 正向應力，單位為 Pa

ϕ 土壤摩擦力，單位為 °

c 土壤凝聚力，單位為 Pa

L_b 試驗裝置長度，單位為 m

H_b 試驗裝置高度，單位為 m

W_1 初始監測之試體寬度，單位為 m

W_2 試驗終止時監測之試體寬度，單位為 m

D_{max} 顆粒最大直徑，單位為 m

N_p 顆粒串的顆粒數量

γ 顆粒半徑，單位為 m

E 楊氏係數，單位為 Pa

σ_1 垂直軸向應力，單位為 Pa

σ_2 水平軸向應力，單位為 Pa

L_0 初始監測之長度，單位為 m

L_1 試驗終止時最終監測之長度，單位為 m

ν 泊松比

第一章 緒論

造震或地震斷層引致的近地表變形常危及房屋、大型建設，如核電廠、水壩、隧道及公路，不僅可能造成數千人的傷亡，且供電設施若受到破壞，將使工廠缺少電力而停工；交通運輸若受到破壞、停駛的鐵路、客運將使貨物、人力運輸停擺，在經濟上造成數千億損失。在實際的例子上，如 1999 年集集地震後，斷層臨近人類活動區域，斷層產生的地形崖、地表破裂破壞沿線的建築。例如斷層產生的地形崖通過光復國中，使其操場受到抬升而被破壞；地形崖通過台三線與中橫公路，使公路受到破壞。地表破裂帶通過石岡水壩，使壩體產生變形與破壞。若能理解斷層引致地表變形的演育過程，便能預測未來地表變形範圍，即早避開地表變形嚴重的區域，減少傷亡。

然而，斷層引致地表變形十分複雜，同一地震與同一條斷層帶下，地表的破裂形貌與範圍也會有所不同。Yu et al., (2010) 調查汶川地震造成地表破裂跡（圖 1.1）。圖 (a) 到圖 (h) 皆為一條斷層截切後，抬升上盤的結果。（a）中，上盤與下盤皆為堅硬岩盤所組成，上盤的岩盤直接抬升至地表，露出其斷層面；（b）中上下盤岩性與圖 (a) 相同，只斷層角度不同，但（b）臨近斷層面的上盤岩盤受到破壞，翻覆至下盤。（a）與（b）顯示出即使斷層截切岩性相同，斷層角度有所變化，變形結果也有所不

同。圖 (a) 到 (h) 皆為同一次地震事件造成地結果，因其斷層截切過的土層特性不同，斷層角度不同，地表變形形貌因此產生變化。集集地震後也出現不同破裂形貌，黃文正等 (2000) 調查 1999 年集集地震後大甲溪至頭汴坑溪地表破裂形貌 (圖 1.2) 後，根據不同地形貌將破裂分成 A 到 I 九種破裂形貌。A 為單一斷層崖，為斷層垂直抬升後的結果；圖 B、C、E、F、G、H 及 I 也為逆衝斷層演育的形貌，但斷層可能產生複數的分支斷層、或背衝斷層，進而影響地表破裂的形貌；除了斷層抬升所造成的破壞形貌外，在 D 中可以看見，斷層不只造成垂直抬升，還產生剪向力使地表出現雁形排列之伸張裂隙。

從這些結果中顯示同一斷層下沿線破裂可分為許多破裂形式。這些破裂形貌的變化都與其底下的斷層深度、斷層角度、斷層滑動方向、土壤層厚與土壤特性有重要關聯。

當土層受到地下數十公尺深的斷層錯動後會產生變形，土層受到斷層截切而抬升，使地表隆起，產生地形崖；斷層沿著錯動方向滑動，在土層內部演育出破裂帶，破裂發展至地表後，地表上便出現破裂形貌。這些地表隆起、地表破裂若在人類居住的區域中，會損壞房屋、基礎建設；地表下的破裂帶若穿過地下隧道，則使隧道變形與破壞隧道結構。

理解影響地表變形的因素，便能預測不同條件下斷層錯動後地表的變形型態，更有效減少斷層錯動造成的傷亡。力學理論、數值模擬提供良好

的方法來理解斷層引致變形的過程與影響變形變化因素。

Chang et al., (2013) 利用離散元素法，以室內砂箱錯動試驗為模擬對象，模擬不同重力下砂土受到下伏斷層截切過的變形形貌，並改變斷層角度去理解斷層角度對變形的影響。結果證明此離散元素法能精確地模擬砂箱試驗中重要的變形行為，模擬結果也提供砂土在受到不同斷層角度截切的結果。

數值模擬能探討構造演育過程、預測地表破裂形貌及變形範圍，但數值模擬因其理論而有所限制，如 Chang et al., (2013) 在模擬中不考慮水的作用，但在實際砂箱試驗模擬中出現可能因毛細作用而形成的變形結果。因 Chang et al., (2013) 主要模擬砂土的表現，且除了毛細作用的變形結果外，其餘砂土的變形行為皆符合其模擬結果，所以研究結果具有實際的效果。但若只有利用數值模擬的結果來理解構造演育過程、預測地表破裂形貌及變形範圍，模擬的結果便缺少實際的有效性。

因此，將槽溝上的構造演育結果與數值模擬的結果互相對照，便能理解造成構造演育結果的物理理論，並且增加數值模擬的有效性。在 1999 年一系列的槽溝開挖計畫中，各槽溝所出現的構造演育結果，能與數值模擬的結果相互對照，增加數值模擬的實際效用。

圖 1.3 為霧峰鳳梨園槽溝的現地照片與繪製的剖面。此槽溝可以看見清楚起伏的地形崖、土層與礫石層的邊界，以及斷層引致之褶皺形貌。圖

1.3 中有 1999 年集集地震後破裂線主要截切的位置。槽溝所呈現的褶皺形貌、地表起伏形貌，皆為斷層引至變形的最終結果，此結果提供重要的構造資訊佐證模擬結果。霧峰槽溝（圖 1.4）、竹山槽溝（圖 1.5）的構造剖面也提供斷層引致變形的重要資訊。

結合集集地震後開挖的槽溝剖面、力學理論、數值模擬，能有效地建立起力學理論與實際的關係，理解構造演育。Yang et al., (2014) 利用離散元素法，尋找在哪些條件下，會產生如霧峰槽溝的造剖面。離散元素法模擬出霧峰槽溝的變形形貌及其構造，並提供不同的凝聚力對構造演育造成的影响，以及此構造演育過程。

竹山槽溝、鳳梨園槽溝、霧峰槽溝皆為集集地震後在其斷層引致的地形崖上開挖的槽溝。竹山槽溝的層序相對於鳳梨園槽溝、霧峰槽溝而言，構造剖面的各土層的層面較清晰，能清楚的看出沉積的土層、類單斜構造的褶皺形貌、主要破裂線、次要破裂，以及各截切關係（圖 1.5）。兩牆都能夠看見清楚的沉積土層的層面，每層沉積土層都能對應到另一面牆。

竹山槽溝特殊地方在於，此槽溝在南面與北面的牆上只差距十四公尺，兩牆的沉積土層皆相同，兩牆上卻呈現相異的構造剖面。北牆上呈現出完整的類單斜構造，數道破裂跡切過類單斜構造之翼部，一條主破裂線沿向斜軸軸跡發展，截切沉積層，但未發展至地表；南牆上也有類單斜的構造，但有一條主破裂沿其背斜軸軸跡發展，截切沉積層，並發展到地

表。在相同地質條件，且相距只有十四公尺，斷層演育結果卻不同。

竹山槽溝兩牆異化的演育結果，說明斷層引致的地表變形，會因為土壤特性、土層厚度以外的因素而有所不同。

Chen et al., (2007) 與 Huang et al., (2016) 的研究顯示竹山槽溝南北兩牆在前於集集地震三次的古地震事件發生後，皆形成單斜構造，而兩牆構造的差異則在接續的地震事件發生後才形成。

從上述說明可知，演育的差異形成於單斜構造後，而現今尚未了解形成單斜構造時的古地質條件，所以本研究利用離散元素法，先探討哪些地質條件下容易形成單斜構造，提供竹山槽溝形成單斜構造時的古地質條件，建立竹山槽溝構造演育產生差異前的模型，以利探討後續構造演化差異因素，再從符合竹山槽溝的地質條件中，初步探討構造演育異化的可能成因。

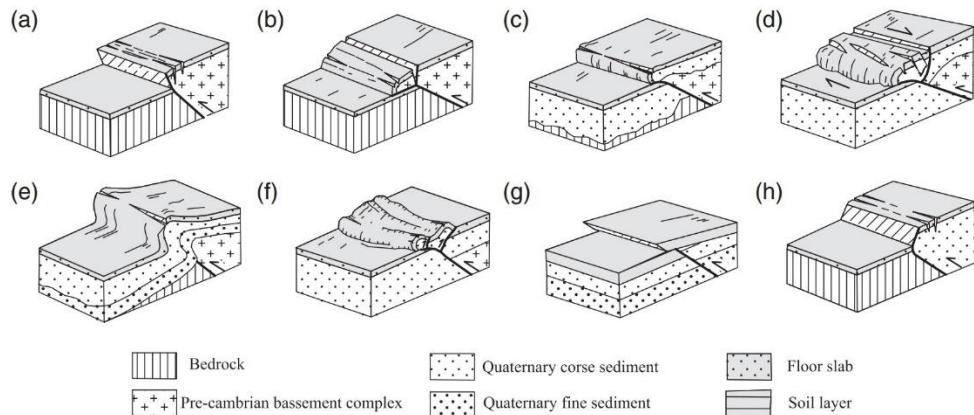


圖 1.1 汶川地震沿線破裂形貌，這八種不同的形貌主要來自於斷層角度變化以及上下盤土層岩性變化。 (Yu et al., 2010)

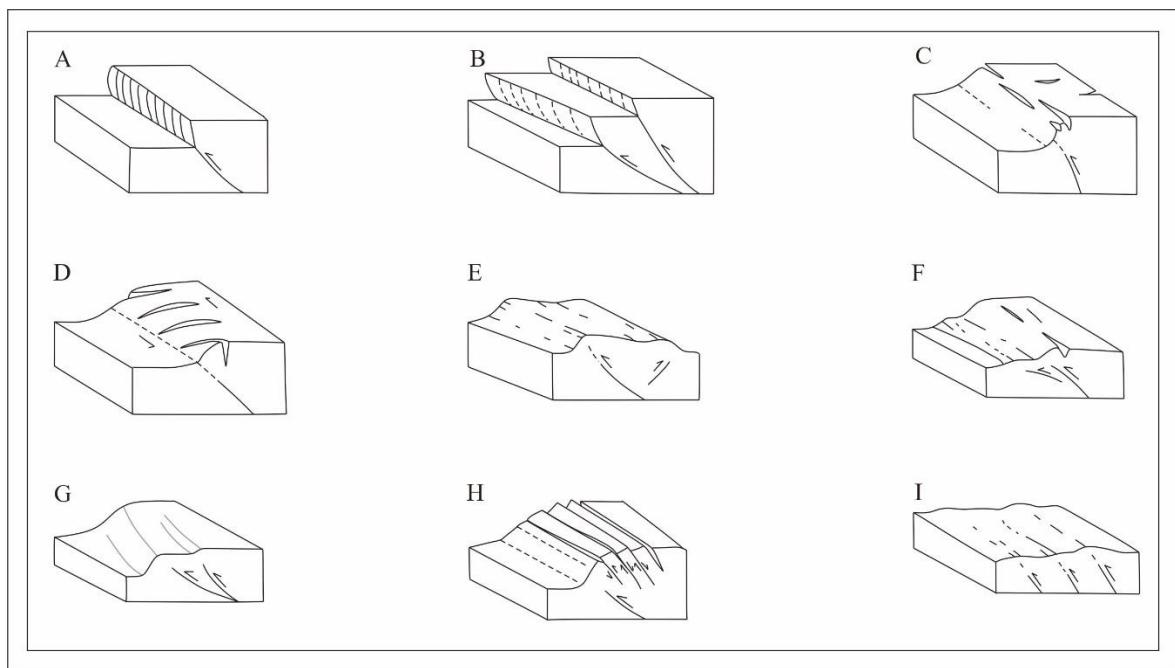


圖 1.2 調查之車籠埔斷層沿線破裂形貌。此圖記錄大甲溪至頭汴坑溪地表破裂形貌。A：單一斷層崖；B：兩道斷層崖；C：地表撓曲，兩組正交之張裂隙；D：地表撓曲，一組雁形排列之伸張；E：地壘狀隆升；F：階梯狀隆升崖及伸張裂隙；G：數道不平行之隆升崖；H：撓曲崖上岩體翻倒。圖文引自黃文正等 (2010)。

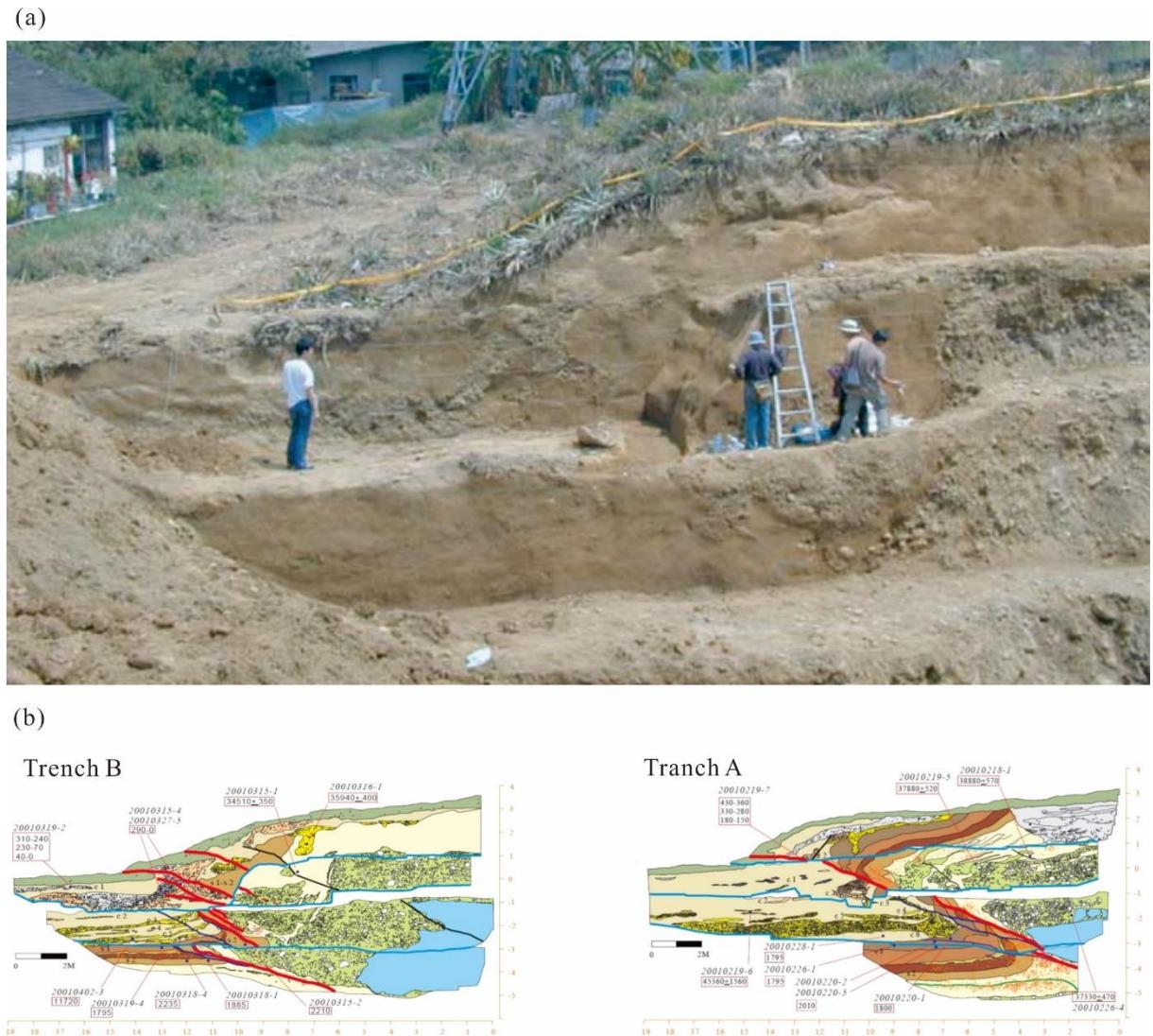


圖 1.3 霧峰鳳梨園槽溝，圖 (a) 為鳳梨園槽溝 Trench B 的現地剖面照片，圖 (b) 為槽溝測繪圖，紅線為震後斷層線，藍線為每階剖面的邊界。從圖上可以看見層序的排列，也能夠看出截切關係以及地表的起伏 (Chen et al., 2012)



圖 1.4 霧峰烏溪北岸槽溝 (Chen et al., 2001) 。



圖 1.5 竹山槽溝南北兩牆剖面圖，左圖為北牆，右圖為南牆。從圖中可清楚看見層序排列、褶皺以及斷層截切關係。北牆能看見槽溝褶皺的向斜軸處被截切，南牆能看見褶皺的背斜軸處被截切，並且切穿至地表 (Huang et al., 2016)

第二章 竹山槽溝介紹

竹山槽溝橫跨於 1999 年集集地震震後形成的地形崖上。由於此槽溝構造主要由車籠埔斷層錯動而形成，因此提供車籠埔斷層所在區域、車籠埔斷層在集集地震震後各段的錯移量以及竹山槽溝位置等資訊，有助於理解斷層在 1999 年集集地震時對槽溝構造的影響。接著介紹槽溝構造剖面，分析槽溝土層特性，有助於設定合理的槽溝模型。由於本研究的目標為建立演育出現差異前的地質條件，因此提供前人推斷之古地震事件資料，決定槽溝南北兩牆演育分歧的時間，找出當時期的槽溝構造以及其斷層錯距，即決定本研究模擬之目標。綜上所述，本章節將介紹車籠埔斷層特性、竹山槽溝土層特性、以及構造剖面之演育。

2.1 車籠埔斷層特性與竹山槽溝介紹

西元 1999 年 9 月 21 日的集集地震，地震矩規模 7.6，震後在台灣中部造成南北向的地表破裂，竹山槽溝所開挖的位置即在集集地震震後的地形崖上。此地震由逆衝斷層引起，造成全長 95 公里的南北向為主的破裂。震後的資料與野外調查顯示集集地震在不同的地點有不同的斷層錯移方向、錯移量及不同且多變的地表變形，黃文正等人(2010)的資料中將大甲溪至頭汴坑溪地表破裂分成九種不同形貌，而 Chen et al., (2007) 根據垂直錯距量與錯移方向分為北中南三段，分為北段的石岡斷層、中段的車籠埔斷層及南段的大尖山斷層(圖 2.1)，各段內容如下所述：

北段：石岡斷層，為層間滑動的逆衝斷層，斷層上盤帶著上新世的錦水頁岩出露地表。此段為北 30-40 度西的逆斜移系統，垂直抬升量約為 3 到 9.5 公尺。

中段：車籠埔斷層，其斷層上盤為上新世的錦水頁岩，下盤則為第四紀後沉積物。此段為北 70-90 西的逆衝斷層，垂直抬升量為 0.5 到 3 公尺。

南段：大尖山斷層，上盤由少量上新世砂岩-頁岩組成，下盤則由更新世砂岩-礫岩組成。大尖山斷層為集集地震破裂帶的最南端，止於走向滑移的鹿寮斷層。此段與其他兩個不同，主要為北 50 度東的滑移斷層，垂直抬升量約為 0.2 到 1 公尺。

竹山槽溝位於車籠埔斷層南段（圖 2.1），為集集地震後一系列槽溝之一。槽溝中南牆與北牆為其主要的構造剖面（圖 2.2 與圖 2.3）。

槽溝位於三公尺高的河階台地上，集集地震破裂帶即沿著河階以及西部麓山帶邊緣破裂。槽溝長 40 公尺，寬 14 公尺，深 8 公尺，槽溝開挖後經歷 2005 年颱風破壞後，又向兩側開挖各一公尺。

主要的褶皺構造出現於槽溝南牆與北牆中。槽溝南牆與北牆都出露類單斜構造，兩牆的破裂線皆沿著褶皺的向斜軸與背斜軸發展，但主要截切的位置不同。槽溝南牆截切的位置出現在褶皺的向斜軸處，北牆的截切出現在褶皺的被斜軸處。兩牆面上除了主要截切角度不同之外，兩牆在斷層

下盤的沉積厚度、沉積序列皆相同。根據 Huang et al., (2016) 繪製的剖面，槽溝兩牆的層積序列可分層八層，如圖 2.2 與 2.3 所示。根據 Chen et al., 2007，土層第八層為礫石層，從濁水溪搬運而來，其中礫石層的成分大都為從中央山脈搬運而來的石英岩顆粒。第一層到第七層部記錄了層崩積到沖積的沉積順序，為坡面沖刷以及支流搬運造成的結果。

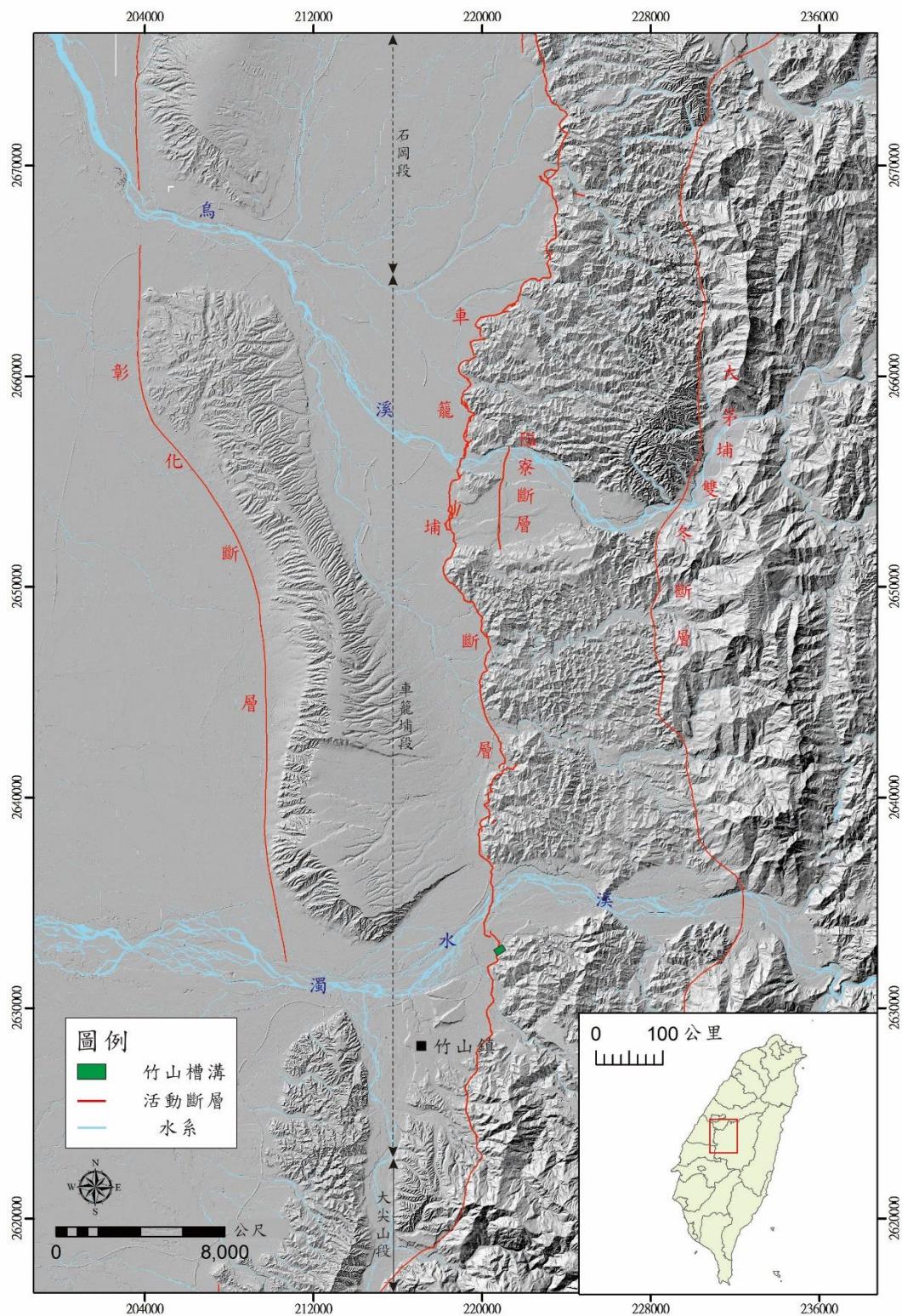


圖 2.1 竹山槽溝位置、以及相鄰斷層位置。根據 Chen et al., (2007) 依照車籠埔斷層在 1999 年集集地震出現的錯移量分成北、中、南三段。

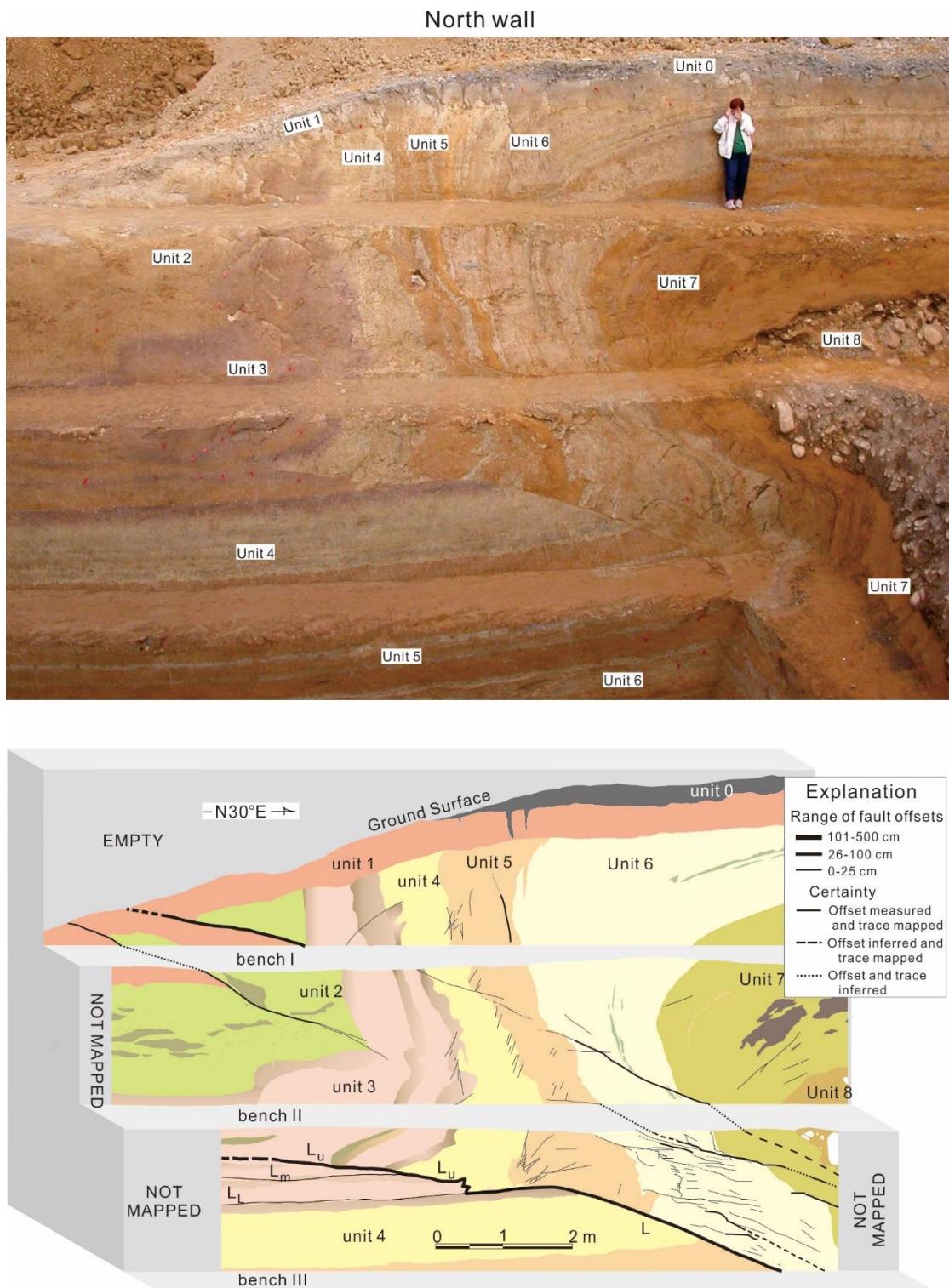


圖 2.2 竹山槽溝北牆剖面，從現地資料中可以以肉眼看出 unit8 的粒徑相對其他層來得大。 (Huang et al., 2016)

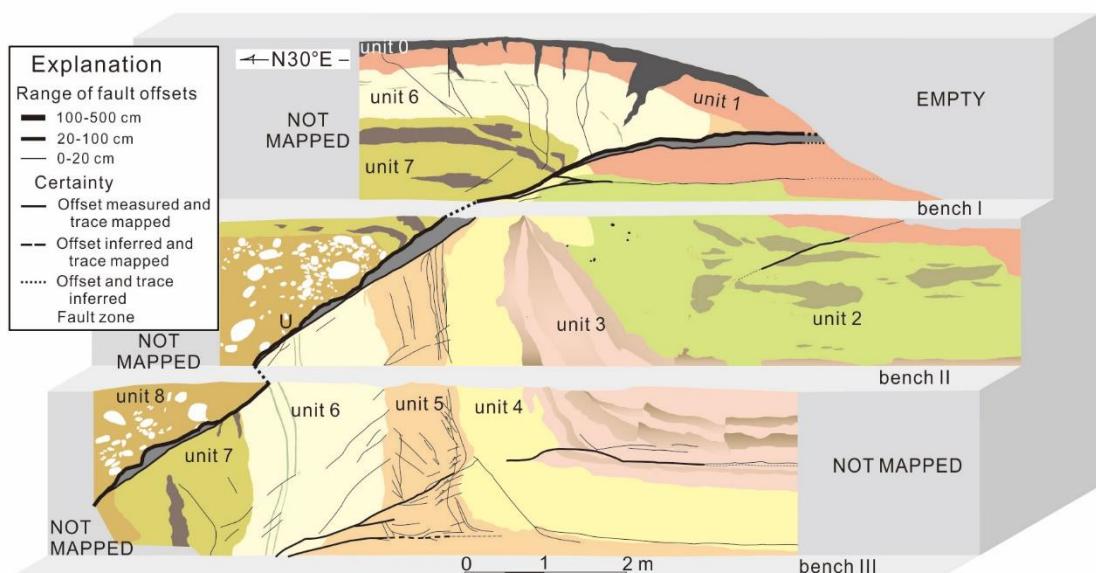
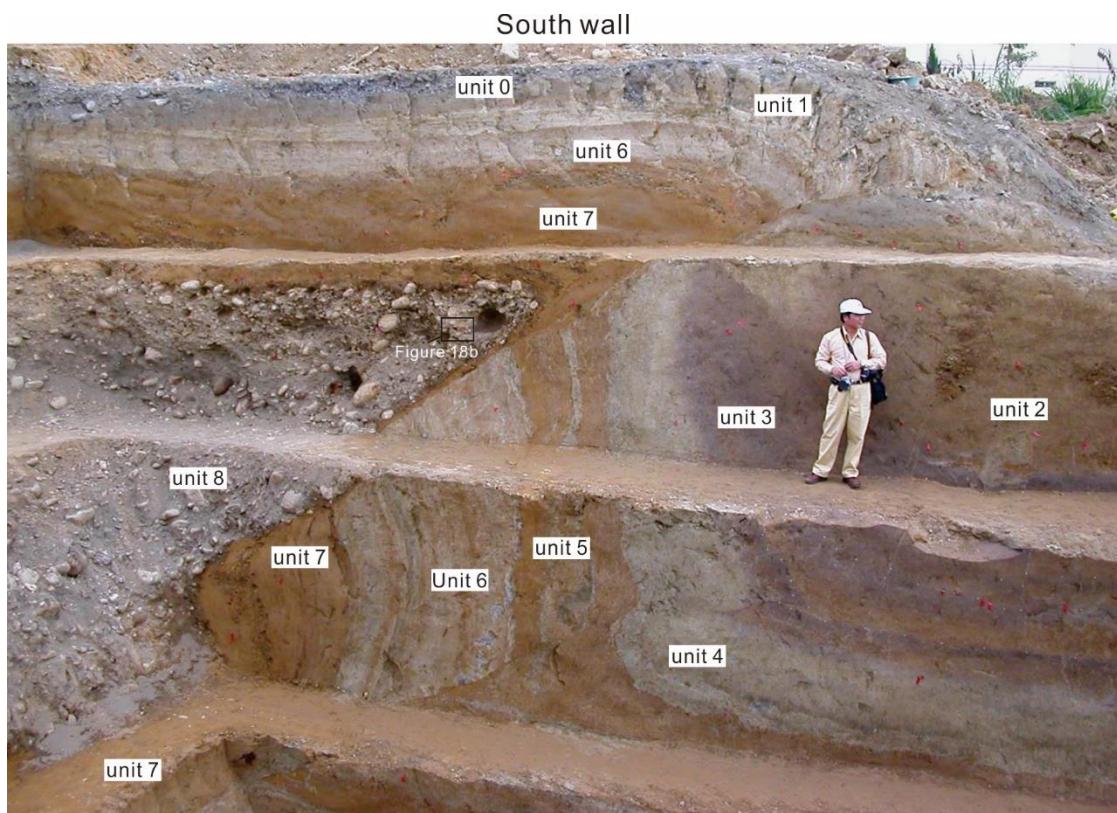


圖 2.3 竹山槽溝南牆牆面與其構造剖面 (Huang et al., 2016)

2.2 沉積單元層與力學單元層之關係

Huang et al., (2016) 將的沉積系列依據其沉積特性分成八層，如圖 2.2 所示。上部的沉積順序從最底層的粗顆粒砂帶著透鏡狀礫石層，然後是帶著薄層砂的泥層，在來是粉砂質黏土層，粉土與有機黏土互層層，砂夾帶著粗顆粒透鏡狀礫石層。

在此依沉積單元圖的層序分類，如圖 2.4，將沉積層依數字從 unit 1 到 unit 8 排序，並依序介紹每層的層積特性，以利分析。

Unit 1 為受到農業耕作擾動後的一層，具有破碎的變質硬岩以及石英，為淺灰色的粉砂質黏土。與下部的沉積層有交角不整合的關係。

Unit 2 為整體而言為黃棕色，含黏土夾砂質粉土。黃棕色的部分由細砂及粉砂組成，此外還有透鏡狀礫石。根據 Chen et al., 2007 指出，此層由坡洗以及支流沉積而來。

Unit 3 為棕色砂泥質粉砂，還帶有黑紫色泥質粉砂。棕色粉砂與黑紫色粉砂平行地層而且交互出現，在棕色粉砂上有出現條狀斑點，黑紫色泥質粉砂為有機質，可以明顯看出四條條帶出現於此層上，此黑紫色泥質粉砂的總後約 10 到 15 公分。

Unit 4 含有藍色的泥以及砂質黏土。大部分為藍灰色砂質泥。當此層吸水後會變得非常黏。

Unit 5 含有棕色砂質及黏土質粉砂，還夾有薄層的灰色粉砂質黏土。

此層含有棕色的粉砂以及藍灰色的泥，層在此為兩條薄層狀平行地層。在棕色層上可以看到條狀的班點。這兩層泥層總厚度為 10 到 15 公分。

Unit 6 含有亮灰色黏土、砂質粉砂並夾薄層橄欖色粉砂質砂。可以在此層中發現一些穿孔 (burrows) 。

Unit 7 含有棕色砂質及泥質粉砂，還夾有透鏡狀礫石。礫石由多稜角的砂狀卵礫石組成。

Unit 8 為棕色的礫石及卵石。這些礫石成分為石英岩，由中央山脈搬運而來。顆粒的大小從卵石到礫石不等。

本研究使用 PFC^{2D} 軟體進行模擬。由於 PFC^{2D} 是以物理理論分析材料的變化，在進行模擬時需分析模擬材料的力學特性，才能使 PFC^{2D} 的模擬對應現實的材料。於是在進行竹山槽溝的模擬前，應該要先將沉積層依其特性做分類，了解每一層力學特性，將相近的材料簡化，不同的材料分別出來，才能設定出與竹山槽溝力學特性相近的模型進行模擬。

在土壤分類法中，參考 ASTM 的分類，若顆粒大於 7.5 公釐為卵石，顆粒小於 7.5 公釐，大於 4.75 公釐為礫石。若顆粒小於 4.75 公釐，大於 0.075 公釐為砂，若顆粒小於 0.75 公釐，大於 0.005 公釐為粉砂，若顆粒小於 0.005 公釐為泥。

從各層的顆粒大小來看，unit 1 到 unit 7 主要由砂土或黏土所組成，都屬於小顆粒的沉積層，顆粒大小主要從 2.0 公釐以下到 0.001 公釐不等。

而 unit 8 則與 unit 1 到 unit 7 完全不同，是由大顆粒的卵石或礫石所組成，從槽溝剖面上看，可以用肉眼看見明顯的顆粒大小，而且主要的粗顆粒都明顯大於 unit 1 到 unit 7 的顆粒（圖 2.2、圖 2.3）。unit 1 到 7 與 unit 8 在顆粒上有明顯的不同，於是我們先將 unit 1 到 unit 7 與 unit 8 分開，將 unit 8 定義為礫石層。

因此我們需要將每個沉積層進行分類，在這部份參考圖 2.5。此資料是經由阿太堡限度試驗得來，阿太堡限度試驗主要是用來得出土壤的液性限度、塑性限度與塑性限度，並以此限度對分類土壤。

接下來針對 unit 1 到 unit 7 進行分類。在黃文正等（2015）對竹山槽溝每一層取樣本進行阿太保限度後，進行土壤分類的結果即為圖 2.5。

從圖 2.5 的資訊中可以得知，unit 1 到 unit 7 的土壤分類結果都分布在同一區塊，而這一區塊的土壤可以統稱為粉砂質黏土，在工程上是力學性質相似的土壤。於是本研究將 unit 1 到 unit 7 的力學條件設定為相同一層，統稱為黏土層。

另外，在 unit 8 的礫石層部分，由於槽溝開挖並無開挖至礫石層底部，因此需藉由其他訊息已了解 unit 8 可能的深度與位置。根據圖 2.6。在平行槽溝南北牆沿線，東北、西南延伸處各有一孔鑽井，圖 2.6 的左側為 No.1 的鑽井資料，隨著深度呈現出粒徑大小的變化。礫石層的粒徑主要從地表下 8 公尺處開始，一直到 16 公尺後粒徑又變化成砂顆粒。而在 2.6 圖

右的 No.2 鑽井資料中，礫石層的厚度約為 15 公尺。從這些資料中可以得知，礫石層可能為 8 至 15 公尺厚。

經過簡化，本研究將竹山槽溝的剖面分成兩層，上層是由 unit 1 到 unit 7 組成的粉砂質黏土層，下層是 unit 8 所組成的礫石層，之後的模擬皆將竹山槽溝假設由這兩層組成進行模擬。

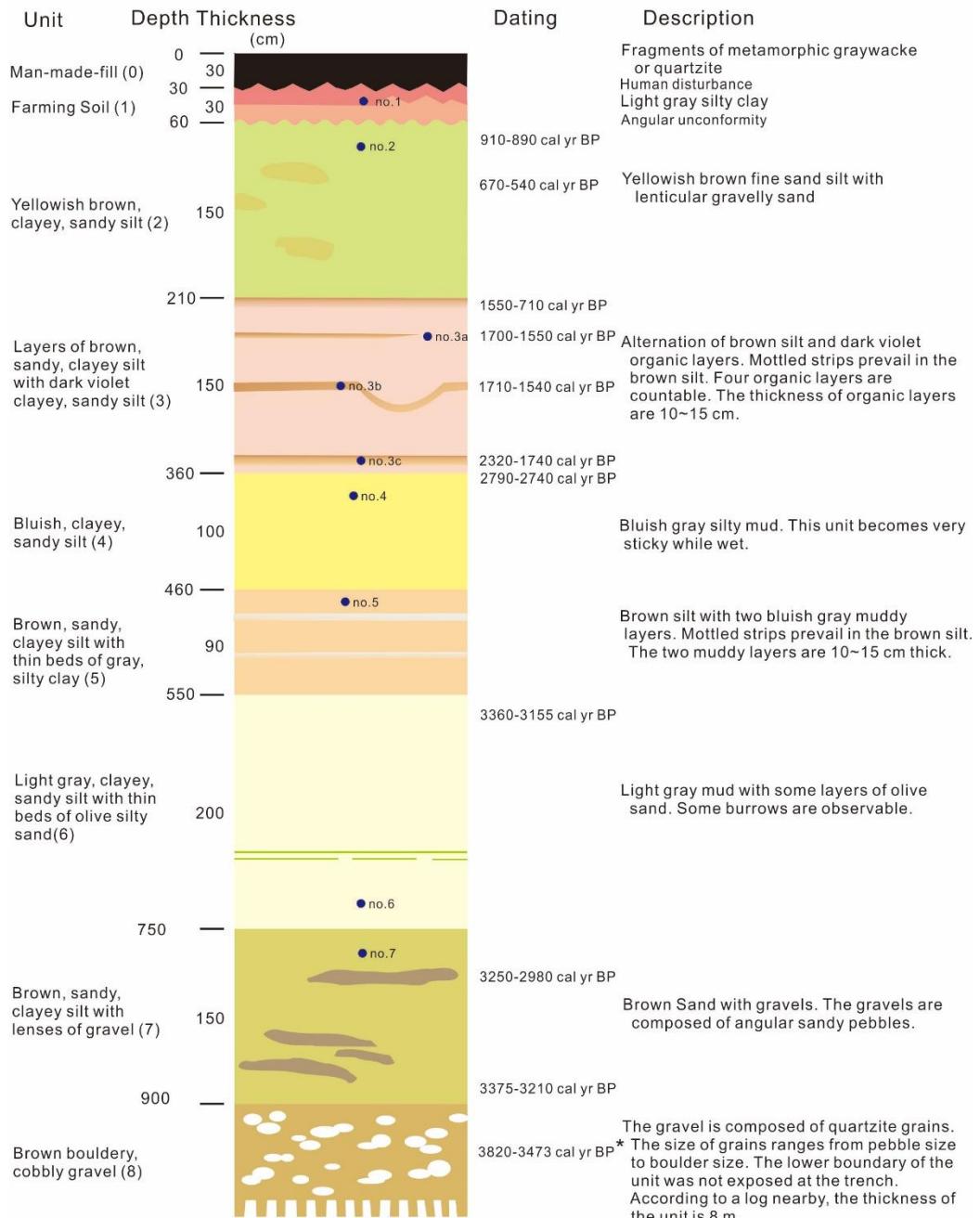


圖 2.4 竹山槽溝之沉積單元 (Huang et al., 2016)。圖左的說明為各沉積單元的定年，圖右為各沉積單元的細部描述。圖中所定出來的年為碳同位素定年之結果。藍點的位置為樣本採取的位置，每個樣本的位置對應到圖 2.5 的樣本分析結果。

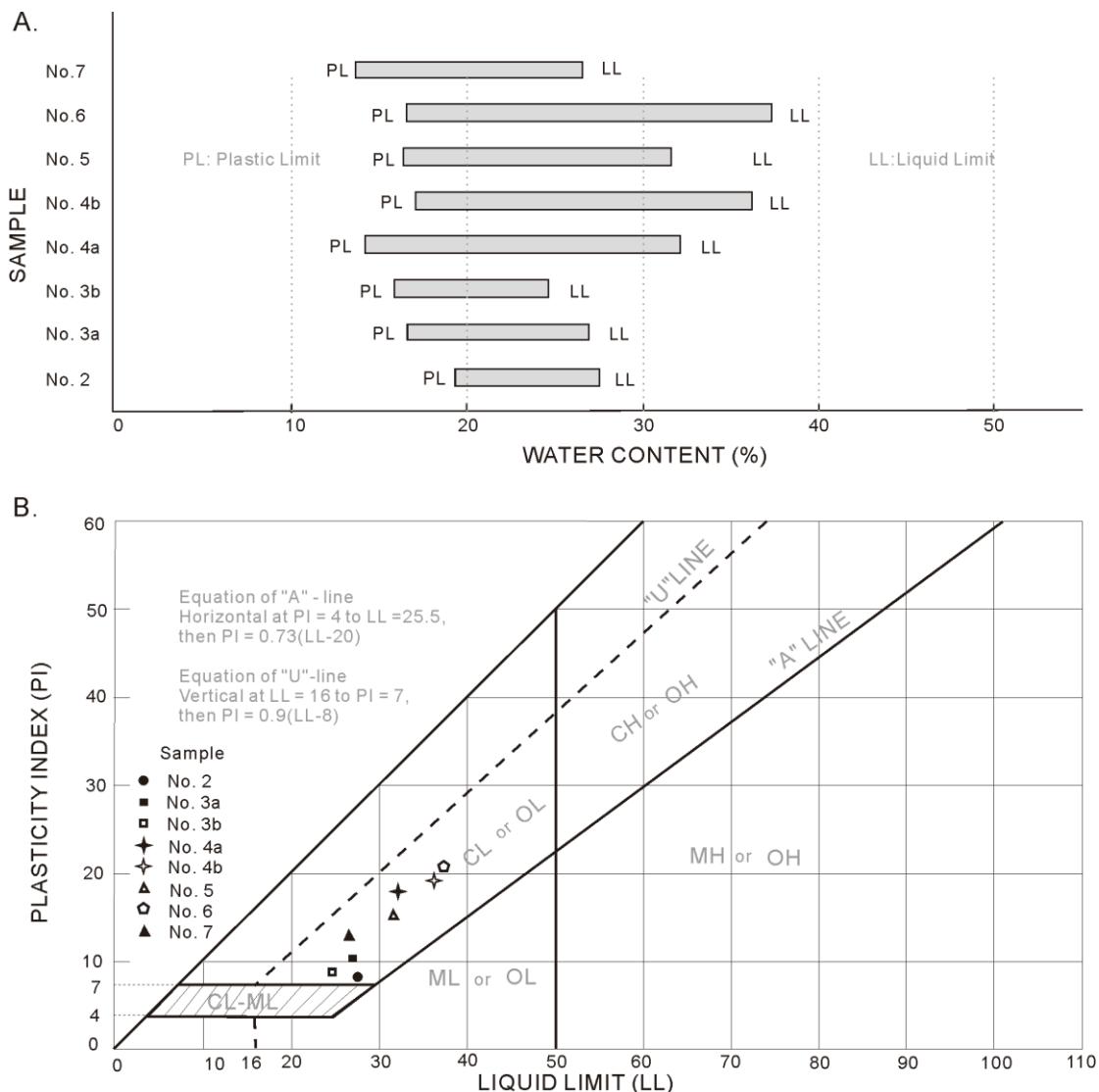


圖 2.5 各沉積單元土壤分類之結果 (Huang et al., 2006)。A.為塑性限度與液性限度下含水量的變化，B.為各樣本在塑性圖下之結果。從圖中可以看出所有樣本皆位於同一類的土壤類別中。

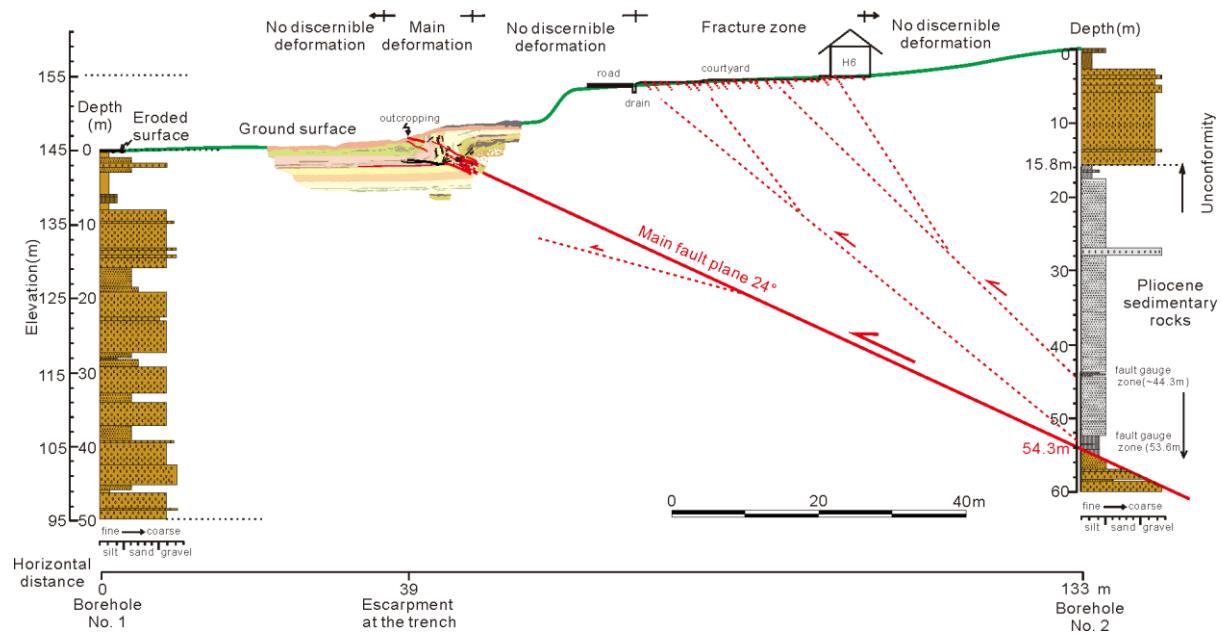


圖 2.6 竹山槽溝兩鑽井資料與深部斷層位置圖。從鑽井資料對應到槽溝的主破裂線上來看，斷層在深處時可能合併為一道主斷層，南牆與北牆的破裂演育即由這一條主斷層引致（圖引用自 Huang et al., 2016）

2.3 竹山槽溝剖面構造演化

從竹山槽溝的沉積沉序中可以發現，最老的沉積單元，即 Unit 8 受到斷層錯動抬升後構造剖面變形為隆起的扇形曲面，曲面最高處與最低處的差距即為斷層的垂直抬升量。根據竹山槽溝開挖的剖面以及鑽井資料（圖 2.6）得知，曲面的最高處與最低處相差為七公尺，代表地震在此處總共產生了七公尺的垂直抬升量。

根據鑽井資料與槽溝破裂線的比對，槽溝的破裂帶在土層深處可能合併為一條主破裂帶，根據 Chen et al., (2007) 推斷北牆深處的主斷層角度約為 24 度。

此結果遠大於集集地震後所造成的錯動，因為此地區曾受到數次的古地震發生。古地震發生的次數、時間、錯距可從觀察層序的進覆、斷層在每各沉積單元上的錯距、以及斷層尖端的終點位置推斷。

根據 Chen et al., (2007) ，包括集集地震在內，竹山槽溝總共出現過五次地震，本研究在此說明其中四次重要的地質事件，並點出構造演育差異開始之處，做為模擬對象。

藉由地震所出現的位置，以及斷層切過地層所產生的錯距，參考 Huang et al., (2016) 所修改的回推剖面，如圖 2.7 所示。

圖 2.7 左邊為北牆，右邊為南牆，從兩牆在各地震事件的變化可以看出兩牆的演育模式。

在集集地震發生後，可以看出南北兩牆在褶皺的翼部都產生破裂，但兩牆的破裂發展並不相同，北牆是有複數破裂跡穿過褶皺翼部，但北牆本身尚且看得出整個單斜構造；而南牆有兩條主要的破裂跡穿過翼部，其中上部的破裂跡已經切穿褶皺，產生明顯錯距，並且切穿至地表。

在集集地震前一次古地震後，南北兩牆有顯著的差異。北牆已經出現一條破裂跡切穿褶皺的下部，而南牆也產生了一道切穿褶皺上部的破裂跡，同時也發展了一條切穿褶皺底部的破裂跡。

在前集集地震兩次的古地震後，北牆仍保有完整的單斜構造，尚未見到任何的破裂跡產生；南牆已經有一道切穿整個褶皺，位於褶皺頂部的破裂跡出現，使得南牆的褶皺產生錯距。

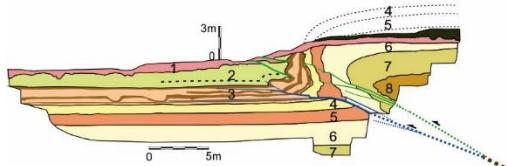
在集集地震前三次古地震後，南北兩牆並幾乎沒有任何顯著的差異。南北兩牆都呈現完整的單斜構造。

兩牆的演育差異在集集地震前兩次古地震後才開始，在演育產生異化前，兩牆階產生相同的單斜構造，所有演育的異化從此構造產生之後才出限。因此先尋找出在相同土層、斷層垂直錯距下產生單斜構造之地質條件後，再利用數值模擬主斷層深度、角度以及粉砂質黏土層凝聚力強度，理解哪些地質條件下才容易形成單斜構造，並尋找出影響槽溝演育異化的參數。

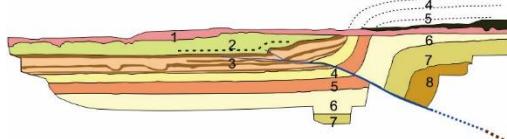
北牆

南牆

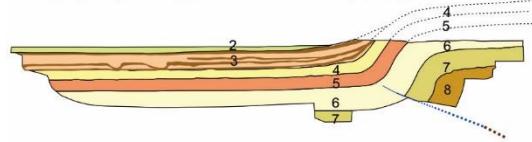
a. 1999年集集地震後



b. 前集集地震一次古地震後



c. 前集集地震二次古地震後



d. 前集集地震三次古地震後

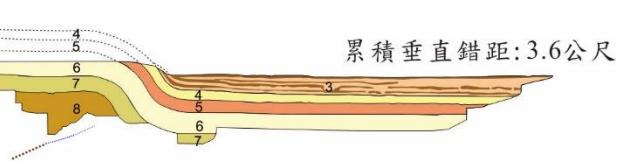
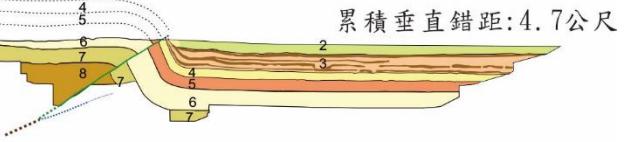
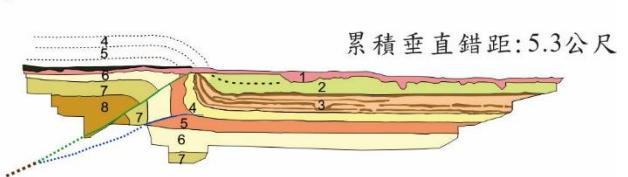
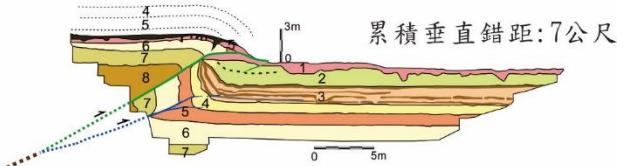
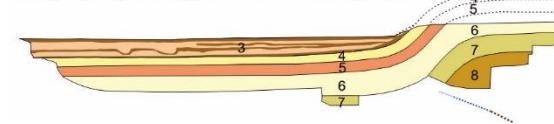


圖 2.7 竹山槽溝回推剖面。圖片右方的垂直錯距為每古地震後累積的垂直錯距。槽溝南北牆觀察到兩道主要的破裂跡，綠線表示破裂帶上方的主破裂跡，藍線表示為破裂帶底部的主破裂跡。 (修改至 Huang et al., 2016)

第三章 研究方法

3.1 離散元素法

離散元素法 (discrete element method, DEM) 是由 Cundall (1974) 首先提出的數值方法，將模擬的對象拆解成各自獨立的顆粒 (particle) 來分析，顆粒與顆粒接觸後的互動關係以牛頓第二運動定律計算，離散元素法由於顆粒間各自獨立，可以記錄顆粒的位移、旋轉、接觸力等資訊，而且相對於連續性的數值分析，離散元素法的顆粒各自獨立，沒有像有限元素法的網格有變形限制，故可用來分析不連續性的變形問題。

PFC^{2D} 是由美國 Itasca Consulting Group Inc. 以離散元素法原理所發展出的數值分析軟體，特色為將模擬的對象假設成許多圓形顆粒組成，提供三種模式模擬顆粒的碰撞、膠結、摩擦等行為。

在 PFC^{2D} 中，有幾個最重要的基本假設：

- (1) 顆粒可視為剛體。
- (2) 顆粒間接觸面積很小，可忽略。
- (3) 顆粒間接觸點以軟接觸表現，意即顆粒與顆粒，顆粒與牆接觸允許重疊。
- (4) 重疊量的大小與力量的大小有關，可藉由力-位移定律計算，且重疊量遠小於顆粒尺寸。
- (5) 顆粒與顆粒間允許設置鍵結。
- (6) 所有的顆粒皆為圓形，可利用 Clump 指令將元素組合成不同的形狀。

模擬中先將時間切割成許多的小時階 (step) ，而其計算解的方式主要利用外顯有限差分法 (explicit finite difference method) 計算每一個時階下系統的變化 (圖 3.1) ，每計算一個時階，程式均先偵測顆粒位置與顆粒與顆粒間的重疊量，由重疊量計算顆粒受力的大小，在用牛頓第二運動定律計算出每個顆粒會產生的加速度，顆粒便以此加速度在此時階下移動。之後重覆此循環，直到算至指定的力平衡或時階。

此外，PFC^{2D} 內建以下三種接觸模式，去計算顆粒在接觸後產生的力。三種模式分別為接觸勁度模式 (contact stiffness model) 、滑移模式 (slip model) 、鍵結模式 (bonding model) ，接觸勁度模式、滑移模式主要模擬顆粒間變形與滑動的行為，而鍵結模式則用來模擬具有膠結或凝聚力的材料，如岩石、混泥土、黏土等。以下會針對這三者進行細節上的介紹。

(1) 接觸勁度模式：

接觸勁度模式 (Contact-Stiffness Model) 為計算顆粒與顆粒間接觸所產生的力的模式。在 PFC^{2D} 的程式中接觸勁度主要可分為兩個部分，分為 Linear Model 跟 Simplified Hertz - Mindlin model，在模擬中只能選擇其中一種模式作為模擬。本研究皆以 Linear Model 進行模擬。以下會針對這兩個部分各作介紹。無論是哪一種模式，在顆粒與顆粒接觸後，都會產生重疊量以及抗力，只是用不同的方式計算重疊後產生的力量。作用力與反作

用力即在重疊後產生，產生的力作用在兩球心上，如圖 3.2。

(i) Linear Model

在 Linear Model 中，假設顆粒受力的變化為線彈性變化，兩個方向產生力以虎克定律計算，這兩個方向分別為平行球心連線與垂直球心連線。在模型中可以設定虎克定律係數的大小，平行球心連線的力稱之為正向勁度，垂直兩球心連線的力稱之為切向勁度。

力的大小源自於重疊量乘上正向勁度與切向勁度，正向勁度所產生的力為顆粒的重疊量乘上正向勁度，如式 (3.1) F_i^n 為單位時階下的力， K^n 為顆粒的正向勁度， U^n 為顆粒間重疊量， n_i 為球顆粒球心連線方向。而切向勁度的重疊量是從每一個時間下的變化得來，所以側向勁度所產生的力也為一增量，並與重疊量的方向相反，如式 (3.2)。 ΔF_i^n 炖位時階下的切向力， K^s 為顆粒切向勁度， ΔU_i^s 為顆粒間側向壓縮量。

而顆粒間的正向勁度與切向勁度會因顆粒的接觸而改變，如彈簧串聯的方式改變整個系統的勁度變化，無論是正向勁度或者切向勁度都會變化，如式 (3.3) 及式 (3.4) $K_{[A]}^n$ 為球顆粒 A 的正向勁度， $K_{[B]}^n$ 為顆粒 B 之正向勁度， $K_{[A]}^s$ 為球顆粒 A 之切向勁度， $K_{[B]}^s$ 為球顆粒 B 之切向勁度。

$$F_i^n = K^n U^n n_i \quad (3.1)$$

$$\Delta F_i^s = -k^s \Delta U_i^s \quad (3.2)$$

$$K^n = \frac{K_{[A]}^n K_{[B]}^n}{K_{[A]}^n + K_{[B]}^n} \quad (3.3)$$

$$K^s = \frac{K_{[A]}^s K_{[B]}^s}{K_{[A]}^s + K_{[B]}^s} \quad (3.4)$$

(ii) Simplified Hertz - Mindlin model

在此模式下，重疊量所產生的力為非線性變化，正向勁度由重疊量、剪力模數、粒徑大小、泊松比所影響，如式 (3.5)，切向勁度則由剪力模數、泊松比、顆粒半徑、正向力影響，如式 (3.6)

$$K^n = \left(\frac{2G\sqrt{2\tilde{R}}}{3(1-\nu)} \right) \sqrt{U^n} \quad (3.5)$$

$$K^s = \left(\frac{2(G^2 3(1-\nu\tilde{R}))^{1/3}}{2-\nu} \right) |F_i^n|^{1/3} \quad (3.6)$$

在此模式下，所能輸入的數值為顆粒的剪力模數 G 以及顆粒的泊松比 ν 。 \tilde{R} 為兩顆粒之重疊量。

在本研究的模擬中，以 Linear Model 進行模擬。

(2) 滑移模式 (slip model) :

滑移模式為限制接觸顆粒互相滑動的模式，兩顆粒在切向產生的力會受到反向的抵抗力，假設顆粒間最小摩擦力為 μ ，則產生抵抗的最大抵抗力如式 (3.7) :

$$F_{\max}^s = \mu |F_i^n| \quad (3.7)$$

若切向力大於抵抗力，則切向力產生，表示兩顆粒間產生滑動，滑動力如式 (3.8) 所示。

$$F_i^s = F_{\max}^s \quad (3.8)$$

(3) 鍵結模式 (bonding model) :

鍵結模式為在顆粒間設置鍵結 (bond) 限制顆粒間的移動，若兩顆粒間受到的張力或剪力大於設置的鍵結力，則鍵結被破壞，破壞時兩顆粒所受到的正向力與切向力歸零。

依照鍵結形式的不同，可分為接觸鍵結 (contact bond) 以及平行鍵結 (parallel bond) 兩種，以下會針對這兩個部分分別進行探討。

(i) 接觸鍵結 (contact bond) :

接觸鍵結為在顆粒間的接觸點上設置一鍵結，如圖 3.3，若顆粒所受到的張力與切力大於設置的鍵結力，則鍵結破壞，顆粒所受到的力歸零，如圖 3.4。若顆粒不破壞，則滑移模式 (slip model) 模式受到限制，顆粒間無法產生滑動。接觸鍵結的特色在於允許接觸鍵結下的顆粒滾動，鍵結點也可以在顆粒的表面移動，如圖 3.4。

在 PFC^{2D} 的設定中，此模擬只會受到拉張的力與受剪的力才會破壞，破壞後兩顆粒視為獨立的顆粒。至於接觸鍵結的門檻值與破壞的表現模式，如圖 3.5 所示。

由於此顆粒指限制顆粒間的張力與剪力，在設定上只要輸入鍵結所限制之正向應力以及切向應力。

(ii) 平行鍵結模式 (parallel model) :

平行鍵結模式為在顆粒間一範圍內設置膠結 (cement) 限制顆粒移

動，其膠結方向與正向接觸勁度平行，故稱為平行鍵結。

平行鍵結的膠結可以想像為均勻彈性彈簧體設置在顆粒間接觸的矩形斷面上。由於平行鍵結為設置膠結在顆粒間，比起接觸鍵結，平行鍵結除了限制顆粒的正向力、切向力外，還限制了顆粒的彎矩能力。

平行鍵結所能限制的最大正向力與切向力如式 (3.8) 所示：

$$\begin{aligned}\sigma_{\max} &= \frac{T}{A} + \frac{|\bar{M}|}{I} \bar{R} \\ \tau_{\max} &= \frac{|\bar{F}_i^s|}{A}\end{aligned}\quad (3.9)$$

其中 T 為鍵結所受之張力， \bar{R} 為平行鍵結之半徑長， A 與 I 為斷面之面積以及慣性矩，而 A 與 I 在 PFC^{2D} 中可以式 (3.10) (3.11) 表示。

$$A = \begin{cases} \pi \bar{R}^2 & (\text{set disk off}) \\ 2 \bar{R} t & (\text{set disk t}) \end{cases} \quad (3.10)$$

$$I = \begin{cases} \frac{1}{4} \pi \bar{R}^4 & (\text{set disk off}) \\ \frac{2}{3} t \bar{R}^3 & (\text{set disk t}) \end{cases} \quad (3.11)$$

在 PFC^{2D} 中可以使用 SET disk on/off 指令調整顆粒的厚度，若使用 SET disk off，則顆粒成圓球形顆粒排列於一平面上。若使用 SET disk on 指令，則顆粒成柱狀圓盤 (disk) 排列於同一平面上，可以調整圓盤的厚度 t 。

設置顆粒為球形或圓盤狀會影響到顆粒本身的體積與質量，進而影響到顆粒的變形行為以及力學表現。將顆粒設定為單一厚度的圓盤。

由於在 PFC^{2D} 中，系統的平衡取決於系統內部所有力的總合，若力的總合趨近於零，則稱系統平衡；若系統總合力大於零，則系統仍處於不平衡的狀態。在上述模式中，只有滑移模式 (slip model) 會消耗顆粒間產生的力，使得整個系統難趨於平衡，而且在實際環境中，微觀的物質除了摩擦力外還有散射波來消散力 (Potyondy, 2004) ，於是在 PFC^{2D} 中，也設置了機械阻尼 (Mechanical Damping) 來消散系統的不平衡力。再 PFC^{2D} 中，主要有 Local Damping、Combined Damping、Viscous Damping 三個阻尼模式。Local Damping 為在整個系統每個時階中消散一定百分比的力，Combined Damping 為當顆粒的速度方向產生變化時產生消散，Viscous Damping 為顆粒在相互接觸時額外產生一個消散力。

在 PFC^{2D} 中只有 Local Damping 為系統一開始就設定的模式，Combined Damping、Viscous Damping 需要使用者輸入指令才會啟動。Local Damping 的公式如式 (3.12) :

$$F_i^d = -\alpha |F_i| \quad (3.12)$$

Local Damping 所設定的參數為 α 。若此參數沒有改動，程式內的預設值為 0.7。

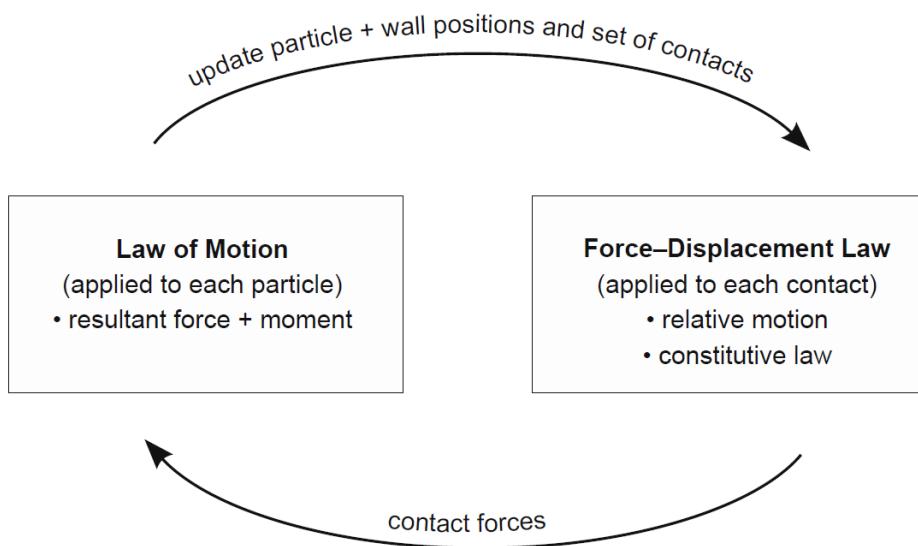
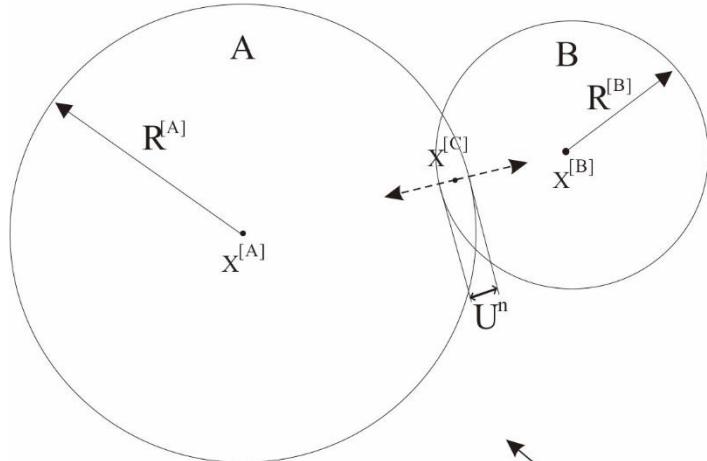


圖 3.1 離散元素法時間計算循環 (引自 PFC^{2D} 手冊, 2002)

a. 球與球的接觸



b. 球與牆的接觸

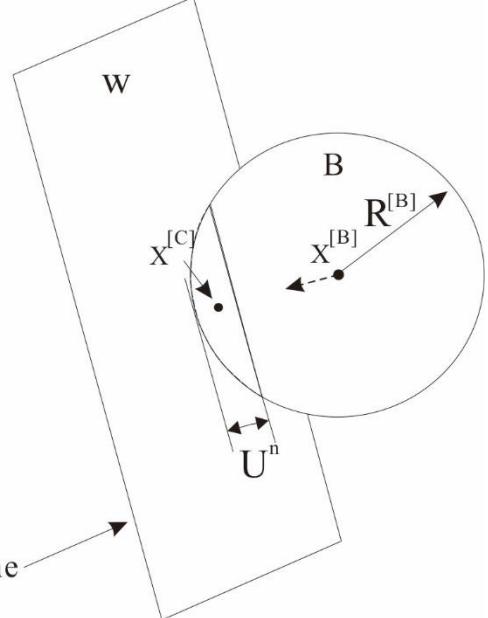


圖 3.2 重疊量示意圖，球 A 與球 B 在接觸面上接觸後產生重疊量 U^n ，並以此計算兩球的作用力與反作用力。 $R^{[A]}$ 為球 A 之半徑， $R^{[B]}$ 為球 B 之半徑， $X^{[A]}$ 為球 A 之球心位置， $X^{[B]}$ 為球 B 之球心位置， $X^{[C]}$ 為兩球接觸之接觸點之位置，虛線箭頭為各顆粒所受到的反作用力，由顆粒平行於球心連線處互相擠壓產生的反作用力，皆與球心連線同向，與朝著各顆粒球心處施力。在 PFC^{2D} 中重疊量主要分為顆粒與顆粒之間的重疊以及顆粒與牆之間的重疊。（PFC^{2D} 手冊，2002）

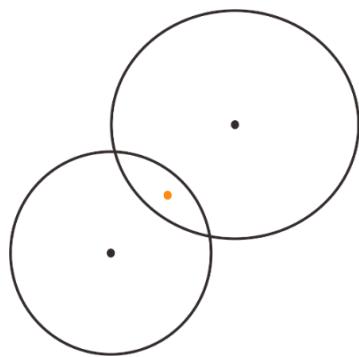


圖 3.3 接觸鍵結示意圖。橘色部分為鍵結黏著處。在設定鍵結後，每一個 step 此處都會有一個朝鍵結中心回拉的力量，根據設定的大小有所不同，當兩顆粒間的距離大於鍵結回拉的力量，鍵結即消失。

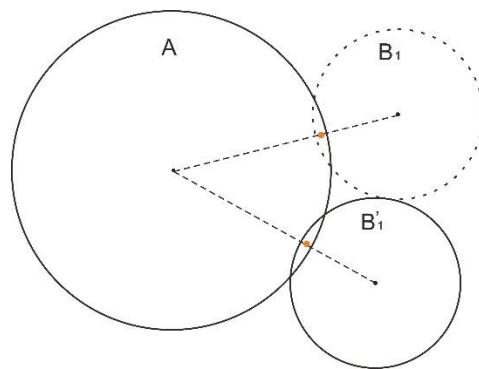
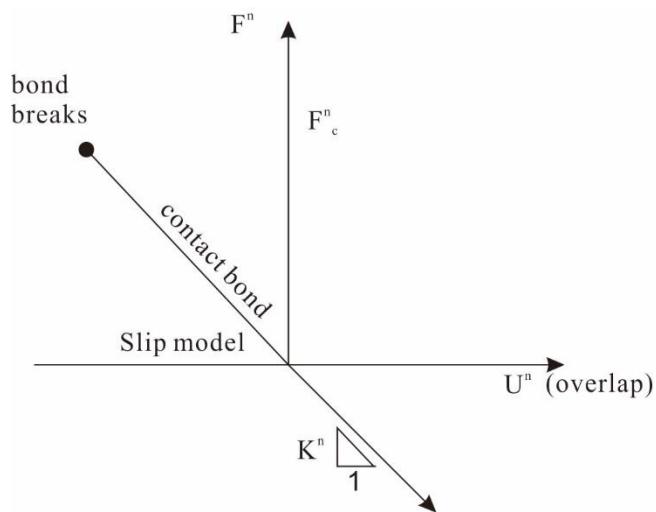
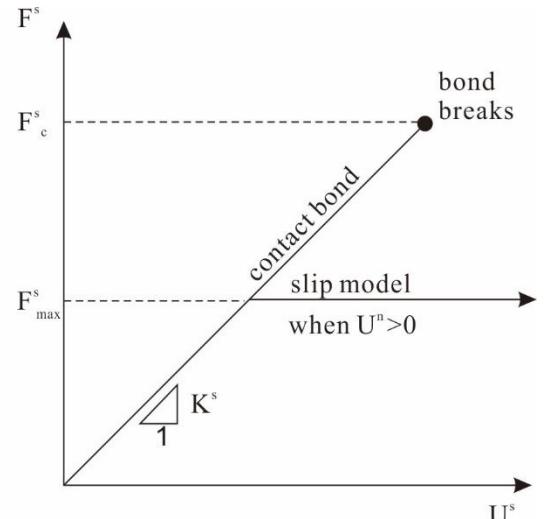


圖 3.4 接觸鍵結能沿著顆粒表面移動而不破裂。球 B1 移動至 B1'，鍵結能沒有斷裂，同時能觀察到 B 顆粒的滑動。



(a) normal component of contact force



(b) shear component of contact force

圖 3.5 接觸鍵結所能承受之張力與剪力門檻值。 (PFC^{2D} 手冊 , 2002)

3.2 力學試驗與 PFC^{2D} 模擬方法

本研究為理解基底斷層角度、基底斷層深度、表土層凝聚力會對斷層引至褶皺的影響，並且輸入符合竹山槽溝錯動時的地質條件，理解哪個三個條件中哪個條件使得槽溝兩牆產生不同的構造演育。藉由從 Chen et al., (2007) 所提供的斷層距資料、古地震事件資料得知在前集集地震三次古地震後，南牆與北牆仍然保持相同的構造，並再繼續產生幾次地震事件後兩牆構造才產生不同。因此本研究先針對這次古地震事件作為研究對象。

在建立竹山槽溝的模型時，需要尋找竹山槽溝中土壤的力學參數範圍，以此參數範圍做根據，按照 PFC^{2D} 的限制以及參數範圍設定合理的模型。

由於 PFC^{2D} 所需輸入的參數並非直接輸入土壤的力學參數，於是在 PFC^{2D} 所輸入的參數需要額外模擬土壤力學試驗，建立 PFC^{2D} 顆粒參數與實際力學參數之關聯。本研究藉由製作研究流程圖，將複雜的模型設置流程圖像化，在加上文字說明，以便使讀者清楚理解研究的流程與方法，如圖 3.6 所示。

本研究藉由 Yang et al., (2014) 所整理出來的黏土力學參數範圍，凝聚力約在 11~70 kPa，抗剪角則在 20° ~ 42°，楊式係數則在 2~250 MPa，泊松比則在 0.1~0.5 間。

而礫石層部分則從張光宗等人 (2012 & 2014) 的文章，以及張吉佐等

人，1996 所提供的礫石層力學參數資料，整理出礫石層的凝聚力約在 15~59.4 kPa 間，抗剪角則在 $21^\circ \sim 50^\circ$ 之間，楊氏係數則在 185.74 ~ 1001.19 MPa 之間，泊松比則在 0.28~0.41 不等。而一般砂土的凝聚力可能為零，也納入範圍中。

統整各類岩性的力學參數與與黏土層、礫石層參數進行比較（表 3.1、3.2），可以發現各類岩石的力學參數都有顯著差異，岩石的力學參數普遍而言遠大於黏土層、礫石層的力學參數，而礫石層的力學參數，在凝聚粒上較小於黏土層，在楊氏係數上，礫石層則大於黏土層。

由表 3.1 可知不同的岩性有不同的力學參數大小，若選擇的參數過大會使得模擬的對象與實際的對象完全不同。參考表 3.2，本研究所模擬的粉砂質黏土層即為黏土層的一種；礫石層即為礫石層，而且本研究蒐集的資料大部分來自於台灣中部的礫石層，以及納入一般砂土的凝聚力強度，意即其凝聚力可能為 0。竹山槽溝的礫石層為一般砂土的力學參數內，也位於台灣中部，因此蒐集而來的資料跟本研究所模擬的對象有一定的關聯性。綜合上述討論，本研究的黏土層以及礫石層的參數設定即選定在這範圍之間，以此參數代表黏土層以及礫石層的特性。

但在 PFC^{2D} 中所需輸入的參數並非直接輸入這些參數，而是輸入微觀下顆粒的參數，於是我們需要用額外的方法將微觀的參數與工程上的力學參數建立關聯。

在現實中土壤的力學參數都是由工程試驗得來，工程試驗都有一系列清楚且完整的方法以求得最精確有效的參數，而在模擬中我們也會在 PFC^{2D} 進行相同的試驗流程，以此試驗流程所計算出來的結果代表模型中各層的力學參數。在本研究中所只有的工程試驗主要有直剪盒試驗、雙軸試驗、以及砂箱試驗。各試驗的工程上詳細流程以及在 PFC^{2D} 裡模型設置的方法會在接下來的小節詳細說明，以下先說明研究流程圖，圖 3.6 的詳細資訊及流程。

本研究先將蒐集來的資料依照其工程與構造的特性進行分類，分成土壤資料以及構造剖面，土壤資料決定模型中顆粒的各項參數設定，構造剖面資料則決定所模型大小以及斷層的角度與位置。

力學參數又可以提供分層的依據，從上述的土壤參數範圍以及礫石層參數範圍可以得知兩層的力學特性上有顯著的差異，於是依此將模型分層土壤層與礫石層兩層，依照剖面的資料決定兩層的厚度，土壤層依資料設定為 9 公尺，礫石層則因為不曉得槽溝剖面變形後斷層錯動時所在的位置，依照當時得斷層錯距，設定最小的厚度約為 4 公尺，最大則為礫石層總厚度 15 公尺。

決定模型的基本大小、決定參數範圍之後，由於 PFC^{2D} 所輸入參數與力學參數不同，接著說明如何建立力學參數與 PFC^{2D} 輸入參數的關係，以得出能代表現實土壤力學參數的 PFC^{2D} 參數。

在工程上土壤的凝聚力與摩擦角可以從直剪盒試驗、巴西人試驗、三軸試驗、雙軸試驗計算而來，在表 3.2 蒐集的凝聚力與摩擦角結果都是從直剪盒試驗得出的結果，且土壤由於本身的強度較低，無法使用巴西人試驗法 (Yang et al., 2014) ，以及在工程上直剪盒試驗由於費用簡單以及試驗快速，直剪盒試驗受到得到廣泛的使用，於是本研究的凝聚力與摩擦角參照 ASTM 直剪盒試驗的試驗流程 D3080，在 PFC^{2D} 中進行相同的試驗。詳細的方法會在 3.2.1 節中說明。

雖然 PFC^{2D} 中有非常多影響凝聚力以及摩擦角的參數，如微觀顆粒直勁與直剪盒的比例、直剪盒長寬比等 (Wang & Gutierrez, 2010) ，以及微觀顆粒間的鍵結強度以及摩擦係數。在本研究中固定顆粒大小，而影響土壤變形最顯著的參數為土壤的凝聚力，因此在 PFC^{2D} 中所進行的直剪盒模擬試驗只會會調整顆粒的鍵結強度，得出一組模擬結果符合蒐集的力學參數的範圍。

工程上的楊氏係數以及泊松比在本研究中是參照 Yang et al. 2014，使用雙軸試驗進行模擬。雙軸試驗是在試體的兩側施加固定的力，在試體的上頭施固定應力或定速度，觀察在試體受壓破裂後頂板所受到的抵抗力以及試體的變形程度來計算楊氏係數以及泊松比。詳細的試驗方法將會在 3.2.2 節中說明。

在 PFC^{2D} 中，影響楊氏係數以及泊松比的主要因素是顆粒本身的正向勁度

K^n 以及正向勁度與切向勁度的比值 K^n/K_s 兩個參數。於是雙軸試驗流程會得出符合現實中黏土層以及礫石層楊氏係數即泊松比的結果。

另外，經由工程上的物性試驗得出的竹山槽溝的顆粒大小、粒徑分部曲線可提供 PFC^{2D} 模型中顆粒大小的設定依據。但由於電腦計算上、PFC^{2D} 軟體本身的限制，PFC^{2D} 的模擬無法使用與現實土壤顆粒相同大小粒徑，也無法模擬無限邊界的結果。因此本研究在模擬槽溝上使用的是在 PFC^{2D} 中模擬砂箱試驗，而試驗的方法主要參考張有毅 (2013) 的博士論文。選擇張有毅 (2013) 的砂箱大小是因為使用此方法後，未來能夠利用實際的砂箱試驗來比對本研究的結果。因此本研究參考張有毅 (2013) 的砂箱大小，將現實的竹山槽溝等比例縮小 100 倍，最小顆粒參照張有毅 (2013) 的最小粒徑，至於顆粒的粒徑分佈曲線，則是依照 Huang et al., (2016) 所提供的物性資料如表 3.3，再 PFC^{2D} 中輸入三種粒徑大小，藉由三種粒徑所畫出與表 3.3 相同的粒徑分部曲線。

根據槽溝的構造剖面，可決定模型各層的厚度、斷層的角度合理的範圍。決定上數所有參數範圍後，便完成模型中所有的參數設定。

由於本研究所使用的竹山槽溝黏土層與礫石層的力學參數都在一個範圍內，而物性參數則從表 3.2 中整理成一個定值，於是在 PFC^{2D} 所設定的參數也會因此分成可變動的參數與固定的參數。由於黏土層與礫石層的粒徑分佈曲線、土粒密度、黏土層厚度為固定的已知參數，於是在模型設定

中，PFC^{2D} 的顆粒半徑、密度、黏土層厚度都為固定不變的數值。

可變動的參數參考上述所提供的黏土層與礫石層的力學參數，黏土層與礫石層的凝聚力、摩擦角、楊氏係數、泊松比都為一個區間，而這些參數影響到 PFC^{2D} 的顆粒的正向勁度、正向勁度與切向勁度的比值、顆粒間的摩擦係數、顆粒間的鍵結強度等。

從先前的資訊中可以得知，槽溝的黏土層與礫石層的力學參數都在一個範圍內，而非一組固定的參數，各參數的改變都影響到黏土層褶皺的變形結果，於是我們必須針對各可變動的參數，調整可變參數，尋找一組符合竹山槽溝前集集地震三次的古地震事件後的變形結果。

以上即為研究流程圖的詳細資訊。在 PFC^{2D} 中，由於所輸入的參數並非現實的力學參數，而是微觀下顆粒本身的參數。於是建立現實的巨觀力學參數與微觀下的顆粒參數之間的關聯，就必須在 PFC^{2D} 中進行與工程上相同的試驗。在本研究中所模擬的試驗有直剪盒試驗、雙軸試驗、砂箱試驗三個工程上使用的試驗。這些試驗在工程上已經有一定的試驗標準與流程，但在 PFC^{2D} 中儘管都會進行與工程上相同的流程，但由於尺寸大小、模型假設的問題，並非所有的模型都有相同的試驗方法。例如粘為東 (2010) 所使用的直剪盒模擬，是以可移動的牆面模擬直剪盒的頂板，Wang& Gutierrez (2010) 則是用許多小牆建立起鋸齒狀的頂板，而林郁鈞 (2014) 是用一串叢集的顆粒做為頂板。

相同的試驗下模型會因為需求不同而有所改變，因此在進行模擬實有必要說明進行模擬的流程與方法，不同的試驗方法將會在以下小節各別說明。

表 3.1 各岩性資料收集彙整結果。

岩類	凝聚力 (MPa)	內摩擦角 (°)	楊氏係數 (10^3 MPa)	泊松比	參考資料
火成岩	10~60	40~60	19.11~105.4	0.15~0.24	潘國樑，2007； West 1995
變質岩	1~60	25~65	4~57	0.2~0.38	潘國樑，2007； West 1995
沉積岩	砂岩	4~40	35~50	4~76.5	水資源局； 潘國樑，2007； West 1995
	頁岩	2~30	20~35	9.6~33.8	水資源局； 潘國樑，2007； West 1995

表 3.2 黏土層與礫石層資料蒐集結果。黏土層部分直接引用至 Yang et al., 2014 之資料，礫石層結果則從 Chang& Cheng, 2014 與張吉佐等人，(1996) 年的資料彙整，以及納入一般砂土可能之凝聚力。

土表層類	凝聚力 (kPa)	摩擦角 (°)	楊氏係數 (MPa)	泊松比	參考資料
黏土層	11~70	20~42	2~250	0.1~0.5	Yang et al., 2014
礫石層	0~59.4	21~50	185.7~1001.2	0.28~0.41	Chang& Cheng, (2014)； 張吉左等人，1996

表 3.3 竹山槽溝沉積單元的粒徑大小，最右邊為平均 Unit1 到 Unit7 粒徑的結果。（引用自 Huang et al., 2016）

Layer	1	2	3		4		5	6	7	average
Legend on Map	Farming Soil	S	OS		SM		Sm	Ms	Ss	
Thickness (cm)	30-50	110-120	150		66		80-90	170-180	194	
Sample No.	2004.7.17-09	2004.7.17-08	2004.7.17-07	2004.7.17-06	2004.7.17-05	2004.7.17-04	2004.7.17-03	2004.7.17-02	2004.7.17-01	
USCS (seive no. 200:	CL									
Grain Analysis	D10	0.0046	0.00306	0.00128	0.00131	0.0013	0.00129	0.00128	0.00126	0.00127
	D30	0.018	0.012	0.0057	0.012	0.0074	0.0043	0.0059	0.0029	0.0011
	D60	0.051	0.062	0.061	0.055	0.048	0.016	0.06	0.01	0.058
										0.002
										0.008
										0.047

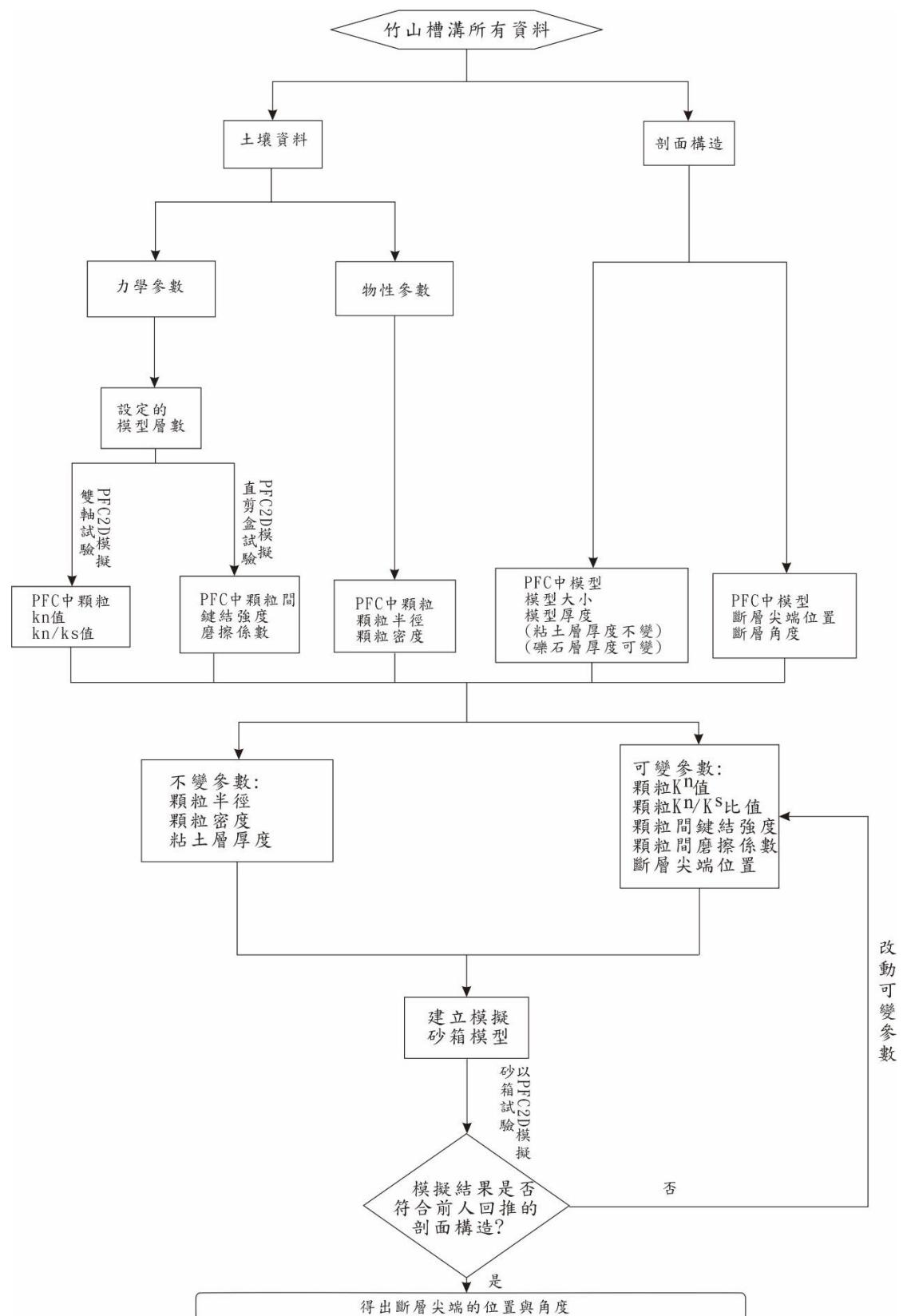


圖 3.6 研究流程圖

3.2.1 直剪盒試驗與模擬方法

本研究所參考的試驗規範為ASTM D3080-90。傳統直接剪力試驗的實驗目的為求出土壤之剪力強度參數凝聚力c及內摩擦角 ϕ ，作為土壤承載力、強度及穩定析之重要依據。

本研究參考林郁均 (2014) 的直剪盒試驗流程，在部分的細節上有所不同，以下會先說明整個試驗流程，再說明研究中不同的設定方式。林郁均 (2014) 在實際的直剪試驗中，是將土樣搗實至剪力盒中，施加固定荷重並開始以定速度剪動，在剪動過程中記錄直剪盒所受的剪應力、剪力位移與垂直變位，待其達尖峰強度後停止。根據ASTM建議，當下盒位移達試體長度的10%時，即可停止剪動所記錄之剪應力位移與剪應力可繪製出剪應力與水平位移曲線。

在固定一組荷重下所得出來的剪應力與水平位移曲線，其尖峰值即代表在此荷重下所能承受之最大剪力。根據摩爾庫倫破壞準則 (式3.13)：

$$\tau = \sigma_n \tan \phi + c \quad (3.13)$$

從公式中可以看出改變不同的正向應力，會得到不同的剪力強度。在進行試驗時改動正向應力，至少使用三組不同的正向應力下記錄到的最大剪應力強度。以正向應力與剪應力為座標軸，將土樣最大剪力強度放在做標點上，依方程式可繪製出一條直線，如圖3.8。此直線的斜率即為欲求之土壤內摩擦角，而直線的截距即為凝聚力。圖3.8為假設之結果，實際上凝聚力

聚力的表現回隨著正向應力的不同而有所不同，但在本研究所使用的正向應力範圍中，凝聚力的表現是以線性表現，符合式3.13所示，所以使用這個公式代表凝聚力。

本研究在PFC^{2D}中進行與上述試驗相同的流程。但在PFC^{2D}中，即使固定試體的微觀參數，模擬的直剪盒大小、模擬的直剪盒強度、模擬直剪盒的剪動速度、PFC^{2D}環境內的時階大小都會影響到凝聚力與內摩擦角的參數。為此，需要提出一些條件使模擬試驗合理，並建立模擬結果與實際試驗的關係，使模擬的結果與現實的情況更具相關性。

本研究在直剪盒裝置大小的部分，參考Wang & Gutierrez (2010) 所提供的建議調整直剪盒大小。Wang & Gutierrez (2010) 調整直剪盒的長度、寬度、長寬比進行模擬，表示顆粒大小與直剪盒大小的關係會影響最終的結果。長度與寬度會影響到直剪盒破壞的位置，如圖3.9與圖3.10，分別為加長直剪盒、加寬直剪盒後，當破壞到達峰值後的破壞面分布狀況。可以從此看出盒子的長寬會影響到直剪盒的破壞分部。此外，在Wang & Gutierrez (2010) 的研究中，顆粒直徑與盒子之間的大小關係也會影響到結果。Wang & Gutierrez (2010) 提出一個建議大小，在設置時直剪盒盒長時直剪盒盒長與最大顆粒直徑的比值 $L_b/D_{max} \geq 60$ ，以及直剪盒盒高與最大顆粒直徑 $H_b/D_{max} \geq 40$ ，以及直剪盒的盒高與盒長之比 L_b/H_b 要介於1.5到2之間。在這個範圍下，直剪盒受剪時的破壞面才會集中在剪動帶上，使

得模擬結果符合現實情況。

本研究固定顆粒的摩擦力為0，設定顆粒間無鍵結，調整直剪盒裝置大小後發現，當顆粒與試驗裝置比例越大，所得出凝聚力就越大，當顆粒大到接近，Wang & Gutierrez (2010) 所建議之顆粒粒徑與裝置大小的比例時，所得出之凝聚力趨近於0，符合現實應砂土該有的表現。這應是由於顆粒越大，顆粒受剪的過程中越難跨過接觸的顆粒，使得顆粒產生互鎖(Interlocking)的現象，而這個互鎖的現象不隨著正向應力的增加而增加，因而納入凝聚力的參數中，使得結果與實際情況不同。

為了能檢核試驗的結果，參考張有毅的建議，同時記錄直剪盒上盒與下合的應力變化，計算上下合的凝聚力的差異。根據力平衡的概念，直剪盒上盒與下盒的結果應接近，如圖3.11，直剪盒上盒與下盒，所受到的力學條件仍然相同，在相同力學條件下，得出來的結果需要相同。圖3.11中，藍色為上盒的監測範圍，監測這些區域所受到的剪應力。綠色為下盒的監測範圍。圖右為模擬之粉砂質黏土層其中一個結果。由於PFC^{2D}模擬中，直剪盒上盒與下盒中間有插入一固定的剪動面，會使上下盒兩盒的應力不完全一致，但是兩盒的初始應力條件相同，當達到破壞時，插入的剪動牆只有長度的5%左右，影響不大，因此上下兩盒得出來的凝聚力與摩擦角的結果也需相近。在第四章中，所有的模擬上下盒參數皆十分相近。

根據ASTM建議剪動的距離，在剪動至剪動盒長10%後停止剪動。

在本研究中，為使凝聚力的數值達到平衡，剪動速度調整為 1×10^{-5} m/s，時階則與槽溝模擬試驗相同，為 1×10^{-4} 1/s。

本章節說明試驗的流程與模擬裝置設置方式，模擬的參數與結果將在4.1章說明。

本研究所使用之直剪盒模擬之流程及如上述，模擬之模型裝置如圖3.12所示。試驗裝置中盒長為18公分，盒高為12公分。

數字為牆的編號，編號1與9、5與6代表有兩個牆重疊建立，由於PFC^{2D}中的牆元素只有一邊能與顆粒接觸，因此為了模擬實際情況，直剪盒剪動面上下兩面皆有牆，因此設置兩面牆，數字2, 3, 4為下盒邊界，數字7, 8, 9為上盒邊界。

直剪盒的邊界是以PFC^{2D}內建的牆元素作為邊界。根據模型的大小參考Wang & Gutierrez (2010) 所建議的最低值。直剪試驗中，當試體剪應力到達尖峰強度後下降或者保持不變一段時間後，即判定試體破壞並停止剪動。本研究參考ASTM的建議，將剪動距離設置為總長的10%，也就是剪動過程到達1.8公分後停止剪動。

根據林郁均 (2014) ，由於在PFC^{2D}的模擬中，牆元素僅能給予速度及位移值的設定，無法固定力；而球元素可以給予固定力，於是使用顆粒，將顆粒固定成一串只能在Y軸方向移動的顆粒串。顆粒串是用PFC^{2D}指令將指定的顆粒元素彼此的相對位置固定住，被固定的顆粒可以一起移動即轉

動。在模擬中，由於要將顆粒串當作平滑的鋼板，於是將顆粒串所有顆粒都給固定住，不允許轉動，以免因顆粒轉動而造成力的散失。本研究使用顆粒半徑為1.5公釐做為顆粒串的半徑，以模擬直剪試驗中之上承壓板。

在模擬中，因需要模擬在不同載重下的結果，顆粒串也會施予模擬試體不同的應力，來模擬直剪盒不同載重下的結果，顆粒串如圖3.12所示。

本研究模擬載重的方式為設定顆粒串的密度，隨著不同的載重顆粒算的密度也會改變。密度的數值將以以下設定調整：

$$\rho = \frac{PL_b}{N_p \pi \gamma^2 g} \quad (3.14)$$

ρ 為顆粒密度、 P 為所需要的壓力、 L_b 為試體的長度、 N_p 為顆粒串的顆粒數量、 γ 為顆粒半徑、 g 為重力。

推導的公式以壓力等於力除上面積、力等於質量乘上重力、質量為二維面積乘上厚度、面積為試體寬度乘上厚度。

確認模型大小、載重計算方式後，這一章節的目的為得出符合土層實際凝聚力、摩擦角的結果。

本章節輸入欲用以模擬斷層錯動之顆粒粒徑、勁度、接觸鍵結強度於模擬之直剪盒中，進行直剪試驗，得出一般土壤的力學參數。因本研究調整基底斷層角度、礫石層厚度、黏土層凝聚力強度來觀察這三個地質條件對斷層引至褶皺之影響，尋找出在哪個條件下，才會產生前人所推測的單斜構造。

根據測試，在這些地質條件中，凝聚力變化會使得直剪盒的結果有所不同，而凝聚力與接觸鍵結有正相關，因此本章節主要為顯示接觸鍵結與凝聚力的關係，以及在PFC^{2D}中的所調整的微觀參數的合理性。

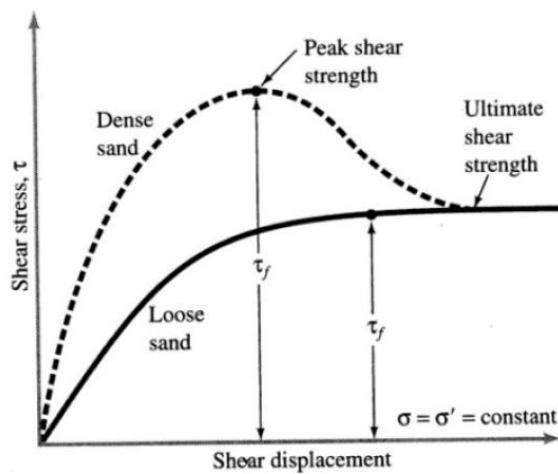


圖 3.7 乾砂直剪試驗結果，縱軸為剪應力，橫軸圍剪應力位移，虛線為緊砂之表現，實線為鬆砂之表現。

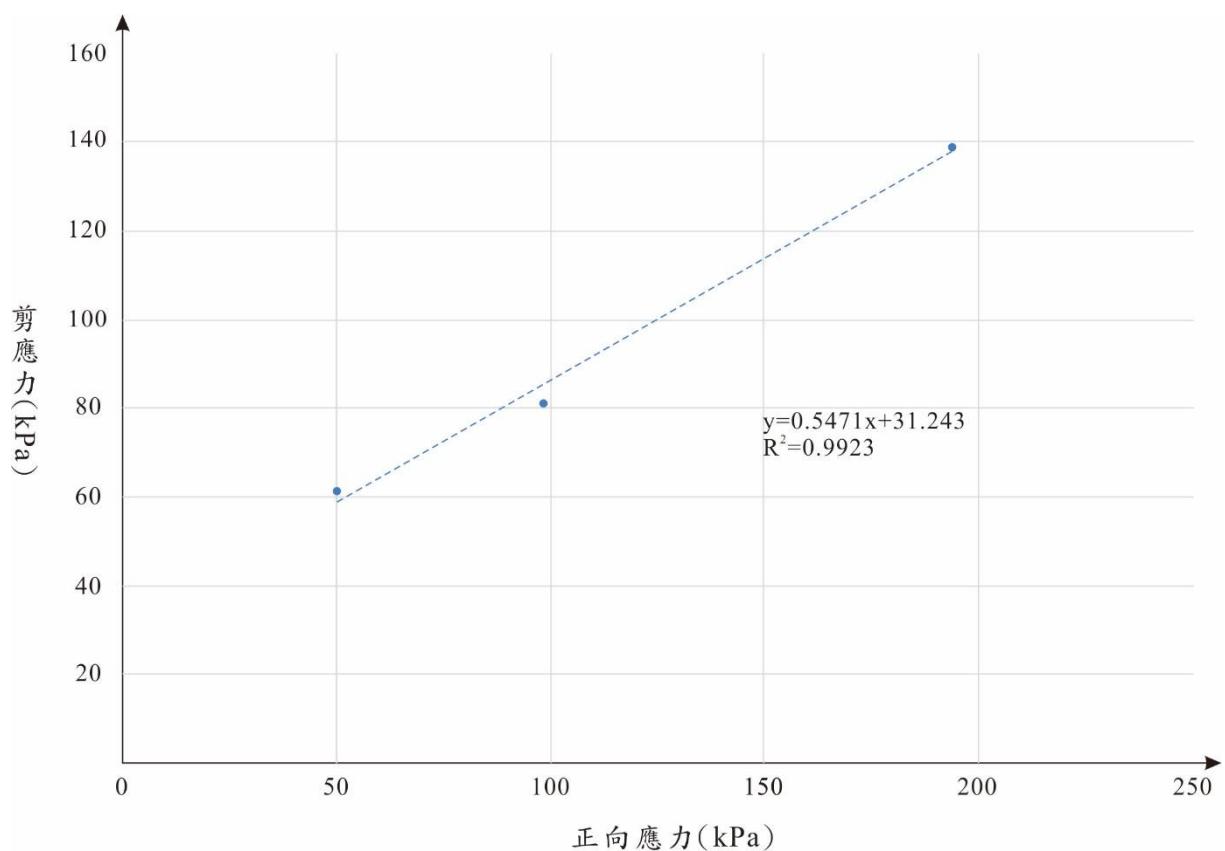


圖 3.8 各點為不同正向應力下最大剪應力值，虛線為破壞包絡線。

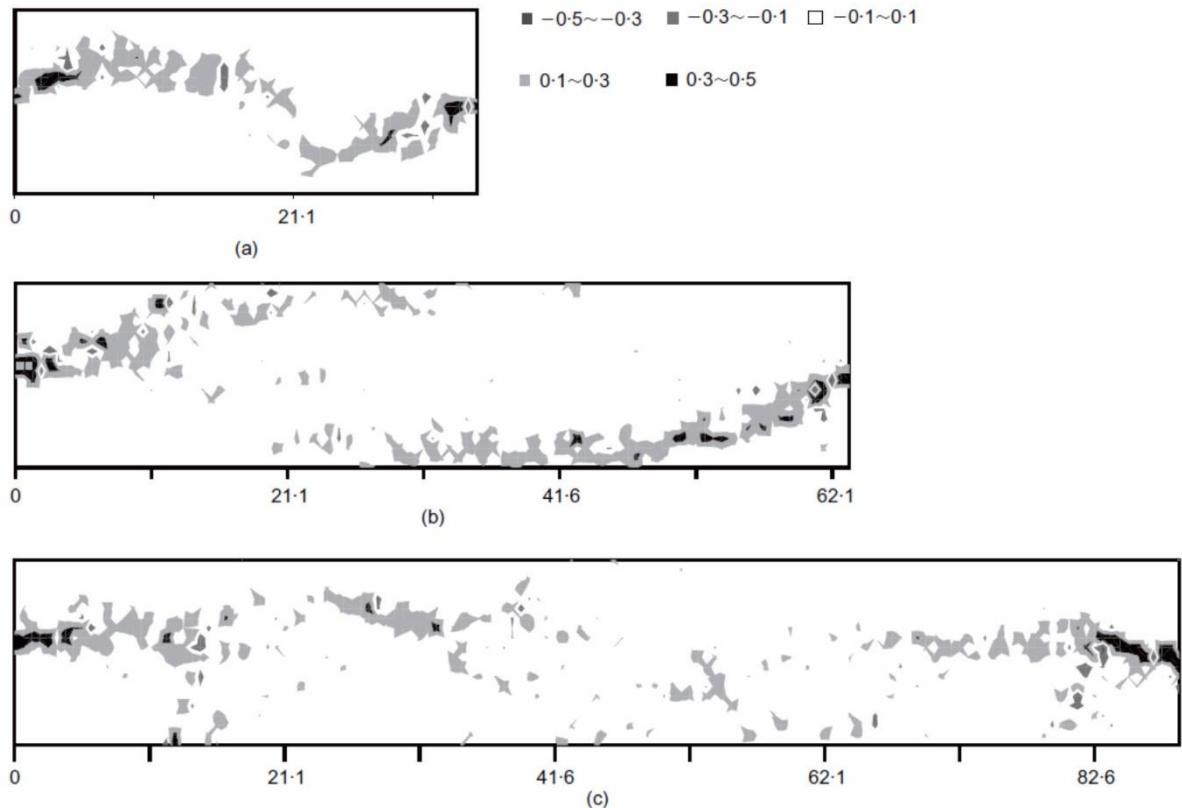


圖 3.9 加長直剪盒長度，剪應力到達峰值時結果。不同顏色代表不同的剪應變大小 (a) $L=35\text{ mm}$ (b) $L=63\text{ mm}$ 。 (c) $L=88\text{ mm}$ (引用自 Wang & Gutierrez, 2010)

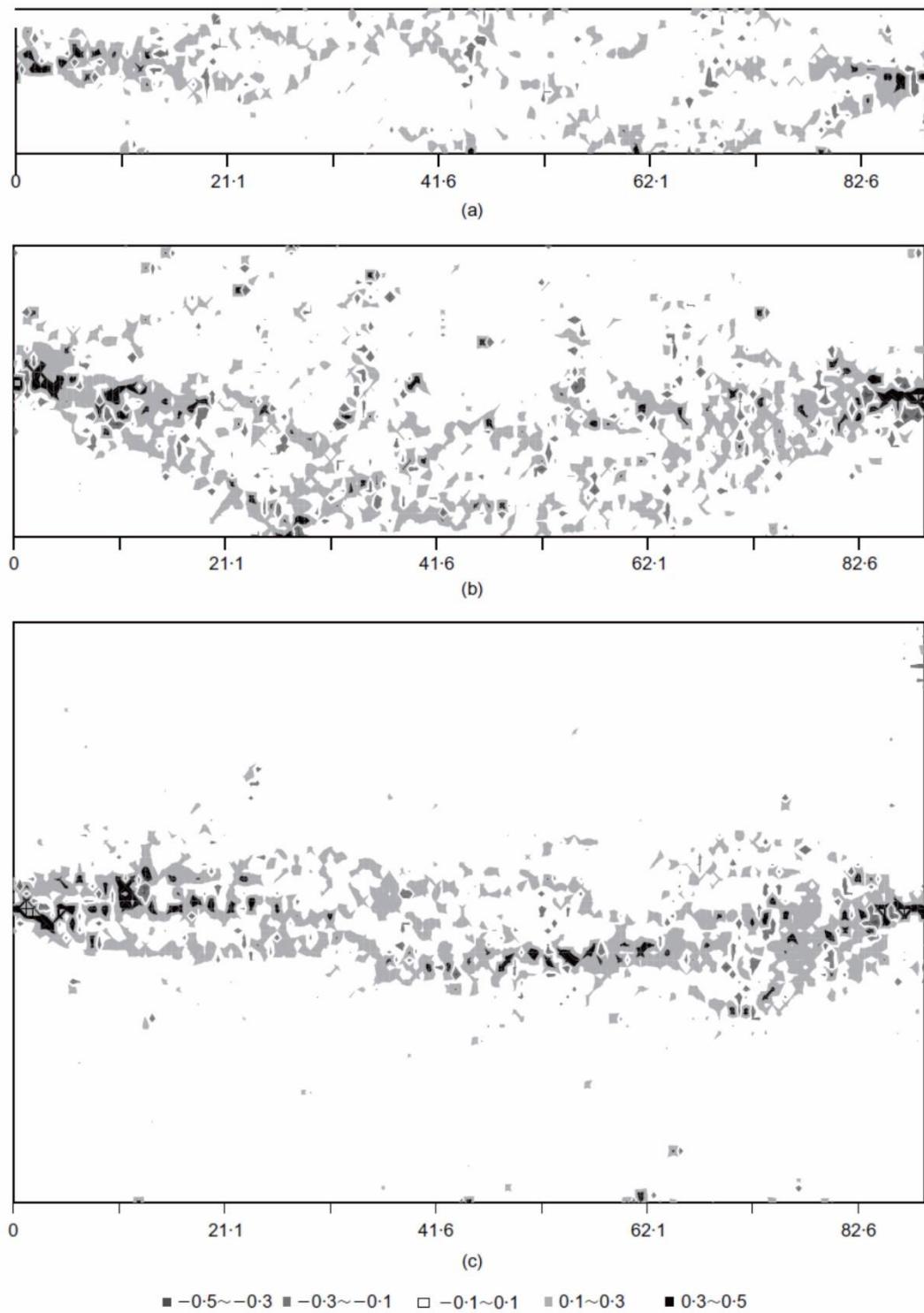


圖 3.10 加高直剪盒，試體受剪到達峰值後，直剪盒內部變化。不同深度代表不同的應變量。不同顏色深度代表剪不同應變大小。 (a) $H=14\text{ mm}$ (b) $H=28\text{ mm}$ 。 (c) $H=56\text{ mm}$ (引用自 Wang & Gutierrez, 2010)

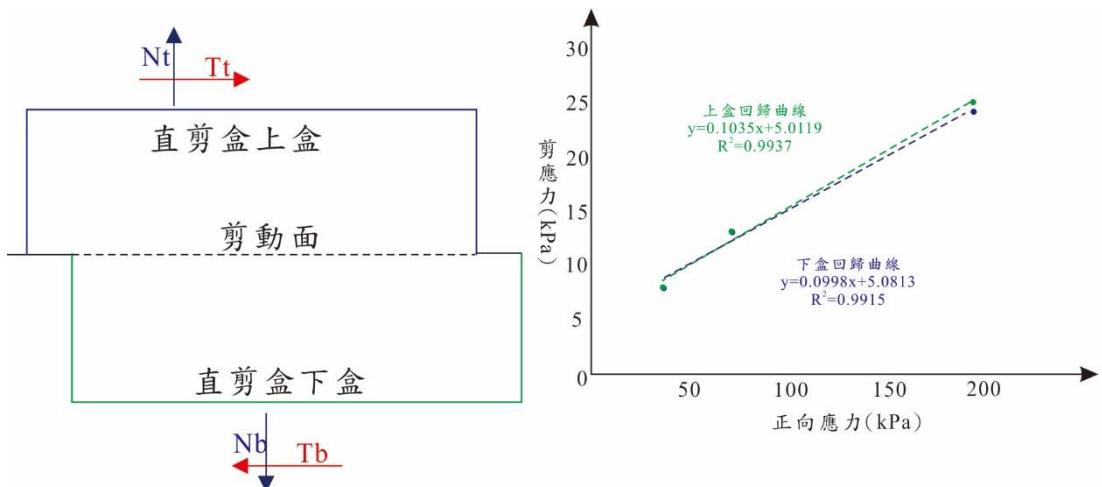


圖 3.11 上下盒應力分佈與切向應力監測位置以及上下盒破壞凝聚力之結果。藍線為上盒的監測區域，綠線為下盒的切向應力監測區域。 N_t 、 T_t 為上盒所受到的正向與側向應力、 N_b 、 T_b 為下盒所受到之正向與側向應力，根據力平衡的概念， N_t+T_t 應該與 N_b+T_b 之應力相等。圖右為兩個監測區域在不同正向應力下所得出的最大剪應力結果。可以看見兩個結果十分接近，說明在此剪動速度、顆粒強度、正向應力、裝置強度下，試驗有達到力平衡之條件。

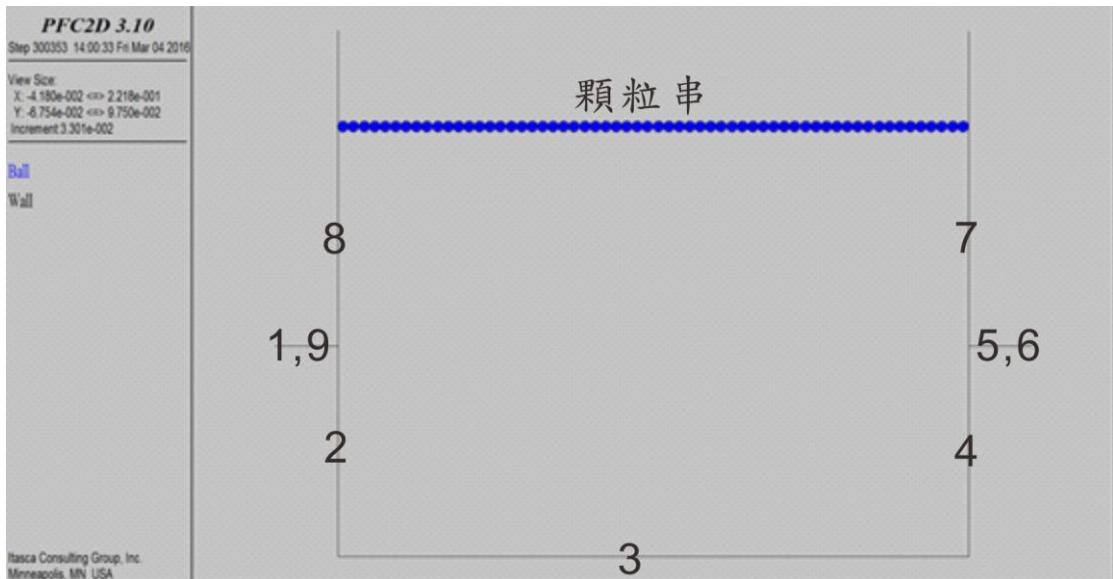


圖 3.12 直剪盒試驗模型裝置。在剪動的翼部設置兩道牆，是因為 PFC^{2D} 設定中，牆元素只有一面能抵抗接觸力、另一面顆粒會直接穿越。因此在翼部增設兩面牆，使顆粒不因剪力而漏出裝置。

3.2.2 雙軸試驗與模擬方法

在現實的工程試驗中，凝聚力以及摩擦角是為了瞭解土壤或岩石能承受的最大抗剪應力以及破壞後的抵抗力。在槽溝的構造演化中，土體除了受到斷層剪動而產生破壞與錯動外，同時也產生變形，形成褶皺。此變形行為與楊氏係數以及泊松比的強度有關聯。本研究蒐集礫石層與黏土層可能的楊氏係數及泊松比的參數範圍（表 3.1），由於 PFC^{2D} 並非直接使用楊氏係數及泊松比的參數，而是使用正向勁度代表顆粒受到正向應力所產生的應變與抗力，用切向勁度代表顆粒受剪所產生的側向應變與抗力。於是需要建立起 PFC^{2D} 所輸入的參數與楊氏係數與泊松比的關聯。

在 Yang et al., (2014) 中，是使用雙軸試驗建立 PFC^{2D} 與楊氏係數與泊松比之關聯。在一般的 PFC^{2D} 模擬中雙軸試驗以及巴西人試驗都能建立起 PFC^{2D} 的微觀參數與巨觀參數的關聯 (Cundall, 1971; Cubdall&Strack, 1979; Potyondy&Cundall, 2004)，但本研究所使用的土壤試體由於強度太低，無法使用巴西人試驗，於是使用雙軸試驗進行 PFC^{2D} 微觀參數與楊氏係數、泊松比之關聯。

由於 PFC^{2D} 模擬顆粒在二維的變形結果，第三維度厚度設一定值，沒有受力與變形。

雙軸試驗的模擬裝置與力學條件如圖 3.15 所示。此條件也與 Yang et al., (2014) 條件相同，以下針對 Yang et al., (2014) 的介紹可用圖 3.13 為示

意圖。

Yang et al., (2014) 所使用的試驗流程為固定施加在試體左右兩邊的應力，頂板產生定速度向下，頂板產生相同的速度向上擠壓試體。監測試體的縮短量以及頂板所受到的抵抗力。頂板所受到的應力持續增加，直到試體破壞。破壞後試體的應力下降，發現頂板所受的應力到達峰值後，即停止試驗。

試驗後所得到的應力應變曲線如圖 3.14 所示。

Yang et al., (2014) 為了使破壞集中，試體的長寬比設定為 1.7，試體的頂部與底部分別設置一牆元素，底部的牆元素固定不動，頂部的牆元素固定速度下壓。由於牆元素不會因受力而產生變形，無法模擬試體受壓後的變形結果，也會因為試體的變形使得左右兩側所施予的力不一致。於是試體左右兩側改由顆粒，左右兩邊的顆粒都設定極強，強至在下壓過程中不會被破壞的接觸鍵結。

楊式係數與泊松比的計算方式參考 Yang et al., (2014) ，如式 (3.14) 與式 (3.15)：

$$E = \frac{\Delta(\sigma_1 - \sigma_2)}{(L_0 - L_1)/L_0} \quad (3.14)$$

$$\nu = \frac{(W_1 - W_0)/W_0}{(L_0 - L_1)/L_0} \quad (3.15)$$

在 PFC^{2D} 中，楊式係數與泊松比的計算方式都參考式 (3.14) 與

(3.15) , 作為本研究楊氏係數以及泊松比的計算方式。本研究同時參考 Yang et al., (2014) 選取楊氏係數與泊松比的計算方式，在應力峰值的一半處的應力與此時的試體長度、寬度變化作為楊氏係數與泊松比的結果。

本研究參考 Yang et al., (2014) 所做的雙軸試驗，設定相同的模型裝置以及試驗流程，並運用相同的計算方式得出楊氏係數以及泊松比，而此楊氏係數與泊松比都是計算在軸向應力峰值的一半下的結果。

在 PFC^{2D} 中，可以記錄下壓的頂板所受的應力 σ_1 。在試體中設置四個追蹤點，記錄四個初始的位置，以及這四個點在受到軸向應力下的位移，這四個點可以計算出初始的 L_0 、 W_0 以及移動後的 L_1 、 W_1 。除此之外，PFC^{2D} 還能記錄側向的顆粒受到的應力的總合，也就是 σ_2 的應力。

在 PFC^{2D} 中可以記錄每個階段下 L_0 、 W_0 、 L_1 、 W_1 、 σ_1 、 σ_2 的數值，因此可以計算出各階段下的楊氏係數以及泊松比。

由於本研究所選取的顆粒半徑、強度與 Yang et al., (2014) 不同，所選用的裝置大小也會有所不同。但試驗的力學條件，流程、結果計算方式與 Yang et al., (2014) 皆相同。不同的部分與其合理性將在第四章節進行說明。

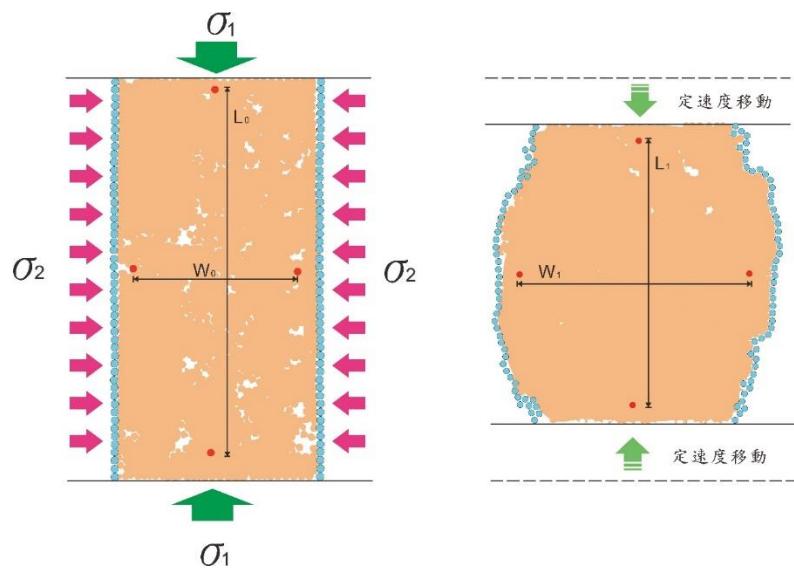


圖 3.13 雙軸試驗模型與結果示意圖，虛線為原檔板位置。（引用自 Yang et al., 2014）

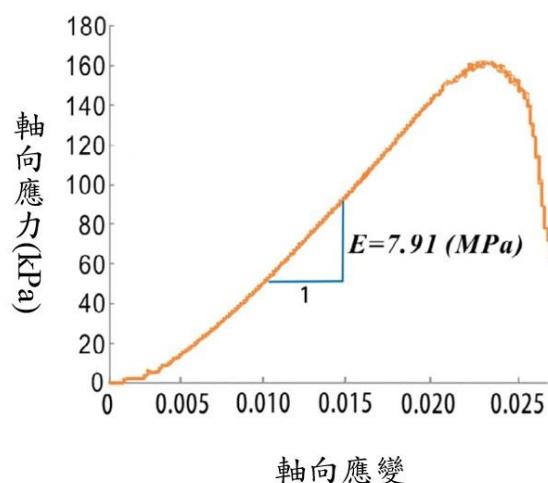


圖 3.14 雙軸試驗軸向應力與軸線應變曲線圖。（引用自 Yang et al., 2014）

第四章 PFC^{2D} 模擬力學參數結果

本章旨在利用模擬工程試驗得出力學參數數值，並將得出來的力學參數結果與實際上力學參數結果進行比較，以利了解 PFC^{2D} 輸入的顆粒參數所代表巨觀上的力學意義，以及參數的合理性。

在本節中說明PFC^{2D}的鍵結參數選擇方式，鍵結與凝聚力、摩擦角有較大的關係，會再4.1節說明；楊氏係數、泊松比則與PFC^{2D}中的 K^n 值、 K^n/K^s 比值有較大的關係。楊氏係數、泊松比的選擇方式與結果將在4.2節中說明。為了使模擬的試體與竹山槽溝構造模擬的環境一致，所有的試驗將以80倍地球重力進行模擬，並且參照Chang(2013)針對不同深度下的顆粒改動其顆粒勁度強度。直剪試驗、雙軸試驗皆加上此條件。

4.1 直剪盒模擬試驗

模擬中，輸入的顆粒參數如表4.1所示。

模型的基礎設定與結果如圖4.1所示，圖4.1為粉砂質黏土層之參數，接觸鍵結為50N，頂板正向壓力為200kPa下的模型與結果。

根據林郁鈞 (2013) 所示，當同一裝置大小下，顆粒數量越多，鍵結束量越多，凝聚力的數值會因為顆粒的數量增加而增加，因此所有試驗皆在相同大小、相近顆粒數量、相同正向應力變化、相同剪動速度下進行模擬直剪盒的裝置強度參考林郁鈞 (2013)所設定之裝置強度， $K^n = 2.4 \times 10^{10}$

N/m ，切向勁度 $K^s = 4.686 \times 10^9 N/m$ ，防止顆粒穿牆，顆粒厚度與直剪盒

長度相同，為18公分。

在粉砂質黏土層的部分，顆粒勁度、摩擦力維持不變， K^n 值設定在 2.2×10^7 、 K^n / K^s 比值設定為2.3。Yang et al., (2014) 認為接觸鍵結符合霧峰槽溝中土層的表現，此土層主要由泥與砂所組成，這兩個土層也出現在竹山槽溝中，表示兩槽溝土層性質相近，因此參考Yang et al., 2007的結果，本研究模擬只調整接觸鍵結，以下以接觸鍵結強度在50 N、100 N、150 N、200 N、250 N、300 N 進行模擬。模擬的結果如圖4.2所示。

根據模擬所得出之模擬試體的力學參數，與蒐集而來的黏土層力學參數比較，得出結果如表4.2所示。

表 4.2 為接觸鍵結 50~300 N 的結果。從表中可以看見，摩擦角則隨著凝聚力增加而減少，但接觸鍵結強度與摩擦角並非正相關的關係，且摩擦角 $28.8^\circ \sim 33.3^\circ$ 、凝聚力 12 kPa~77.7 kPa 的結果屬與實際上黏土層凝聚力範圍相近，因此用 50~300N 的接觸鍵結強度代表黏土層的力學參數。

礫石層的結果以圖4.3所示，礫石層與實際礫石層參數比較則在表4.3所示。

從表4.3、表4.2的結果中可以發現模擬的結果都坐落在合理的範圍，因此鍵結強度在50 N至300 N之間皆為合理的數值。考量到模擬的時間、數量、有效的參數範圍後，粉砂質黏土層以接觸鍵結為50 N、150 N、250 N進行模擬，礫石層為了強化礫石層鬆散的特性，並不設置鍵結。

表 4.1 PFC^{2D} 所輸入之微觀參數。

模擬黏土層之PFC ^{2D} 參數			
顆粒參數	數值	顆粒參數	數值
正向勁度	2.2×10^7 N/m	顆粒間摩擦力	0.73
正切向勁度比	2.3	顆粒半徑	0.73~1.49 mm
接觸鍵結	50 ~ 300 N	顆粒密度	2420 kg/m ³
模擬礫石層之PFC ^{2D} 參數			
顆粒參數	數值	顆粒參數	數值
正向勁度	6×10^8 N/m	顆粒間摩擦力	0.73
正切向勁度比	2.5	顆粒半徑	1.46~2.98 mm
接觸鍵結	0 N	顆粒密度	2320 kg/m ³

表 4.2 模擬之黏土層力學參數與實際參數比較。

模擬黏土層結果			
參數	數值 (kPa)	顆粒參數	數值 (°)
凝聚力	12~77.7	摩擦角	19.8~31
實際黏土層參數範圍			
參數	數值 (kPa)	參數	數值 (°)
凝聚力	11~70	摩擦角	20~42

表 4.3 模擬之礫石層力學參數與實際參數比較。

模擬礫石層結果			
顆粒參數	數值	顆粒參數	數值
凝聚力	4 kPa	摩擦角	33°
實際礫石層結果			
凝聚力	0~59.4 kPa	摩擦角	21° ~50°

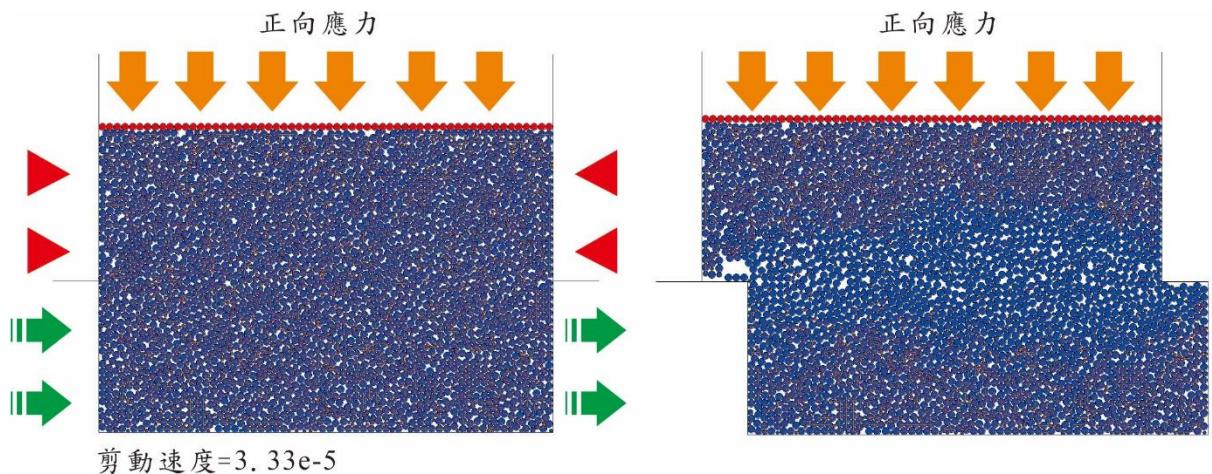


圖 4.1 直剪盒裝置設定。圖左為剪動最初，圖右為最終結果。紅色顆粒為
顆粒串所串起的頂板牆，此顆粒串每個顆粒的垂直高度一致，並不產生相
對位移，整個顆粒串可上下移動，但無法左右移動。藍色顆粒為試體顆
粒，橘色為顆粒之間的接觸鍵結。在剪切過程中，鍵結會抵抗剪動時產生
的力，當剪應力超越鍵結的抵抗力後，鍵結破壞。圖右試體中間部分缺少
橘色的鍵結，顯示的顆粒鍵結都受到破壞，只剩下頂板與底部的鍵結還殘
留。

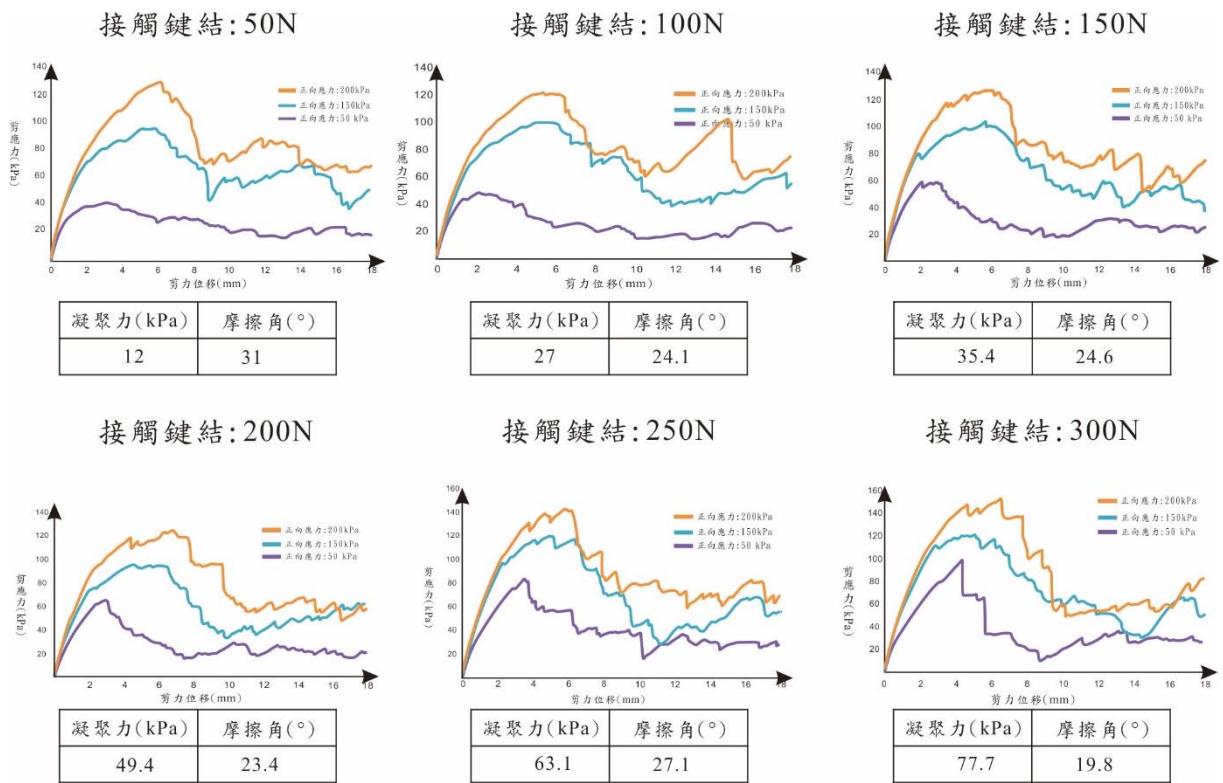


圖 4.2 各鍵結強度結果，凝聚力與接觸鍵結成正相關。當鍵結越強，摩擦角就越低，但並非以正相關的方式出現在結果中。

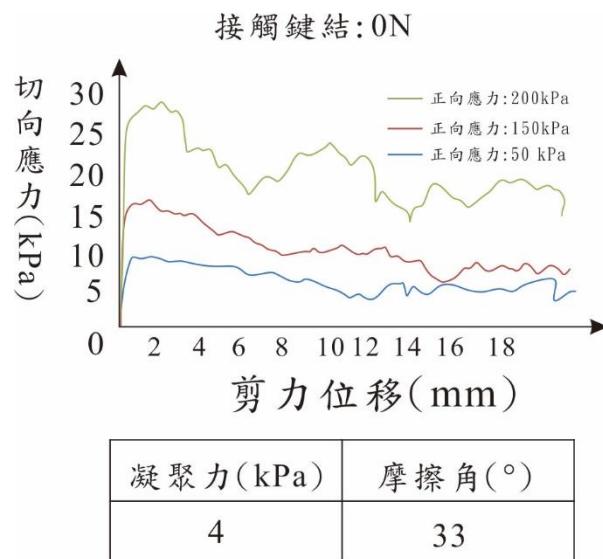


圖 4.3 磯石層直剪試驗結果

4.2 雙軸模擬試驗

在本節中說明 PFC^{2D} 的 K^n 值、 K^n / K^s 值的選擇方式，楊氏係數、泊松比則與 PFC^{2D} 中的 K^n 值、 K^n / K^s 比值有較大的關係。

試體的 PFC^{2D} 顆粒參數如表 4.1 所示。以下所輸入的參數與結果都以表 4.1 的參數進行模擬。

本研究參考 Yang et al., (2014) 所使用雙軸試驗流程，但模擬的顆粒大小與 Yang et al., (2014) 所使用的並不相同。由於粉砂質黏土層模擬的顆粒小於一般試驗裝置大小，本研究直接使用與實際雙軸試驗相似的大小進行試驗。試驗所產生的應力應變曲線也與實際的應力應變曲線相同，因此在黏土層上本研究直接參考實際試驗大小；模擬的礫石層雖然也小於一般試驗裝置大小，但模擬後試體應力與應變曲線並無出現明顯峰值，應力上下擺盪，如圖 4.4 所示。可能是因為顆粒的數量太少，使得傳遞力的過程中顆粒傳遞得太零散使力發散過大，試體便無法持續累積應力，使得結果並沒有明顯峰值。在實際上試驗礫石層的裝置也採用較大的盒子進行模擬，因此本研究在模擬礫石層的時候將盒子放大一倍進行模擬，而其應力應變曲線也與實際的變化相同，因此本研究將以此裝置大小進行模擬，所有的試驗裝置大小如圖 4.5 所示。

如圖 4.5 所示，頂板與底板以牆元素模擬試驗的牆板，側邊為了模擬像皮膜的變形以極強接觸鍵結的顆粒模擬，顆粒不旋轉，以防能量從旋

轉的顆粒逸散。模擬的流程為頂板與底板時朝試體中心施以固定速度，待試體到達破壞後停止頂板與底板的移動，粉砂質黏土層與礫石層的最大壓縮量皆設置在 10% 即停止。

側板應力部分，本研究為了表現試體單純抵抗軸向應力的強度，於是將應力調整至能固定住試體又能使試體在受垂直壓力後自然產生變形，於是選定 100 kPa 作為測板應力大小。裝置大小會影響到模擬結果。如圖 4.4 所示，結果為礫石層參數在黏土層裝置大小下的結果，結果並不合理，因此裝置大小還需要調整。

在施加速度前，會記錄試體上下左右四點，即圖 4.5 中的紅點位置。試驗中會記錄頂板所受到的應力，以及側板所受到的應力，以及上下左右四點的距離變化，從試體試點的變化中可以得出試體的長寬變化。記錄頂板、側板受應力、試體長寬變化後，藉由式 (3.14) 與 (3.15) 能得出試體的楊氏係數與泊松比。

參考一般三軸試驗的試體大小，選取 7.5 公分寬 15 公分長作為粉砂質黏土層的試體大小；由於礫石層顆粒較大，在 7.5 公分寬 15 公分長下無法得出合理的應力應變曲線，如圖 4.4 所示。而現實針對礫石的試驗也都以較大的試驗裝置進行模擬，於是根據模擬中的粉砂質黏土層與礫石層的小差距，將試驗裝置放大一倍進行模擬，將結果當作最終結果，因此將 15 公分寬 30 公分長作為礫石層模擬裝置大小。裝置大小結果如圖 4.7 所示。

至於剪動速度為了使結果更符合模擬斷層錯動試驗的結果，將下壓速度設置與斷層錯動的數度一致，為 3.3×10^{-5} m/s。模擬的時距也與斷層錯動的時距一樣，設定為 10^{-4} 1/s。

粉砂質黏土層由於在模擬的過程中會調整鍵結大小，根據直剪盒模擬試驗結果所示，從接觸鍵結為 50 N 到 300 N 間接為合理大小，於是接觸鍵結在 50 N、100 N、150 N、200 N、250 N、300 N 六個試體進行模擬試驗，模擬的軸向應力對應變的結果如圖 4.8 所示。

從結果中可以看出，楊氏係數與泊松比會跟接觸鍵結的大小產生變化。但在楊氏係數方面只有一兩個 MPa 的變化，而且在應力應變形為上相差甚大。從此結果可以看出，凝聚力增強，對楊氏係數與泊松比都會有影響，但並非以線性表現。無論是楊氏係數或泊松比，都難以從中看出與接觸鍵結強度的關聯性。

礫石層由於顆粒大小，粒徑分析曲線與粉砂質黏土層的條件不同，裝置的形貌與結果也有所不同，裝置的設定與剪動後結果如下圖 4.9 所示。礫石層在本研究中假設由無鍵結的粗顆粒所組成，因此接觸鍵結為 0，結果如圖 4.10 所示。

楊氏係數與泊松比的求法如 3.2 章所示。粉砂質黏土層與礫石層的結果如表 4.5、表 4.6 所示。

從模擬結果與實際結果進行比較，可以發現所有結果皆在合理範圍之

內。為了尋找出合理的黏土層範圍，並且了解黏土層凝聚力的大小對於結果的影響，接觸鍵結為設定在 50 N、150 N、250 N 作為斷層模擬接觸鍵結的調整範圍，對應的凝聚力為 12 kPa、35.4 kPa、63.1 kPa。礫石層則固定以這組參數進行模擬。

表 4.5 模擬黏土層與實際黏土層的楊氏係數、泊松比

模擬黏土層結果			
顆粒參數	數值 (MPa)	顆粒參數	數值
楊氏係數	13.1~15.08	泊松比	0.14~0.29
實際黏土層合理參數範圍			
楊氏係數	2~250	泊松比	0.1~0.5

表 4.6 模擬礫石層與實際礫石層的楊氏係數、泊松比

模擬礫石層結果			
顆粒參數	數值 (MPa)	顆粒參數	數值
楊氏係數	199.2	泊松比	0.35
實際礫石層合理參數範圍			
楊氏係數	185.7~1001.2	泊松比	0.28~0.41

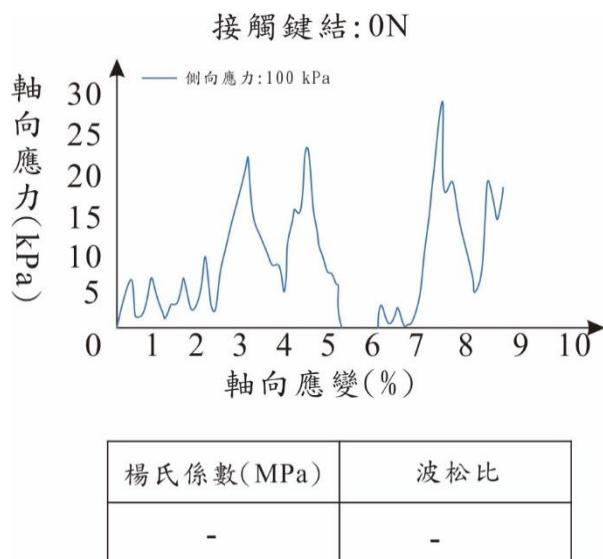


圖 4.4 裝置大小為 $15 \times 7.5\text{cm}$ 碳石層顆粒參數下，軸向應力對軸向應變之變化。可以看見在此裝置大小下，其應力應變變化不規則。

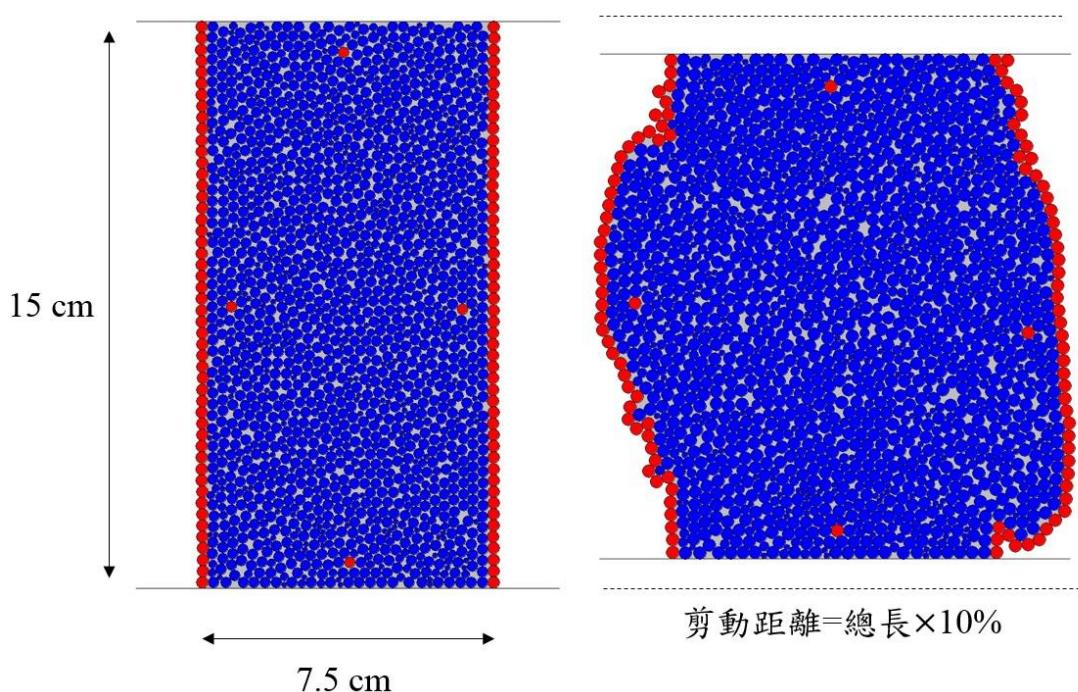


圖 4.5 粉砂質黏土層雙軸試驗模型與結果示意圖。圖左為初始狀態，圖右為試體受剪後之結果。虛線為頂板原來位置。

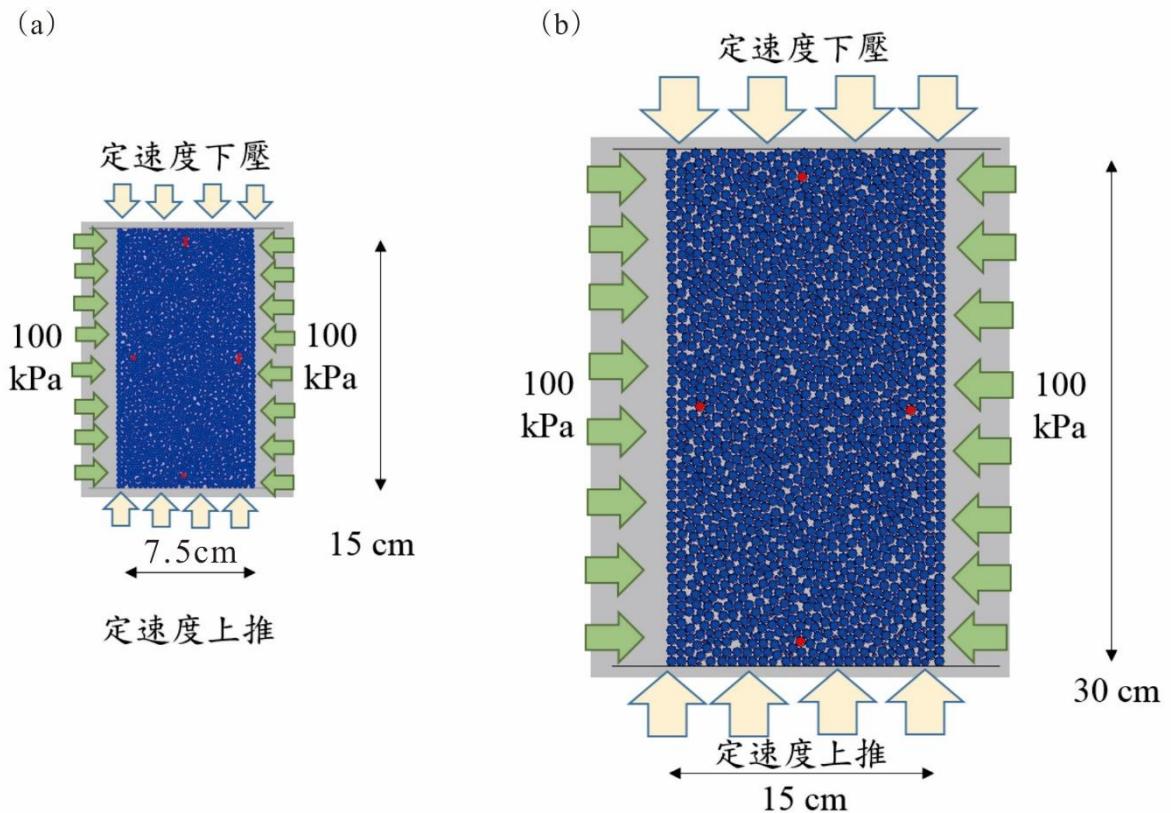


圖 4.6 黏土層與礫石層裝置大小、力學條件示意圖。 (a) 為粉砂質黏土層之裝置大小，裝置長度為 15 公分長，裝置寬度為 7.5 公分，此大小為參考一般試體裝置大小之結果 (b) 為礫石層之裝置大小。由於礫石層的顆粒比黏土層的顆粒大上一倍，試體大小也放大一倍進行模擬。兩裝置之側向應力皆為 100 kPa。

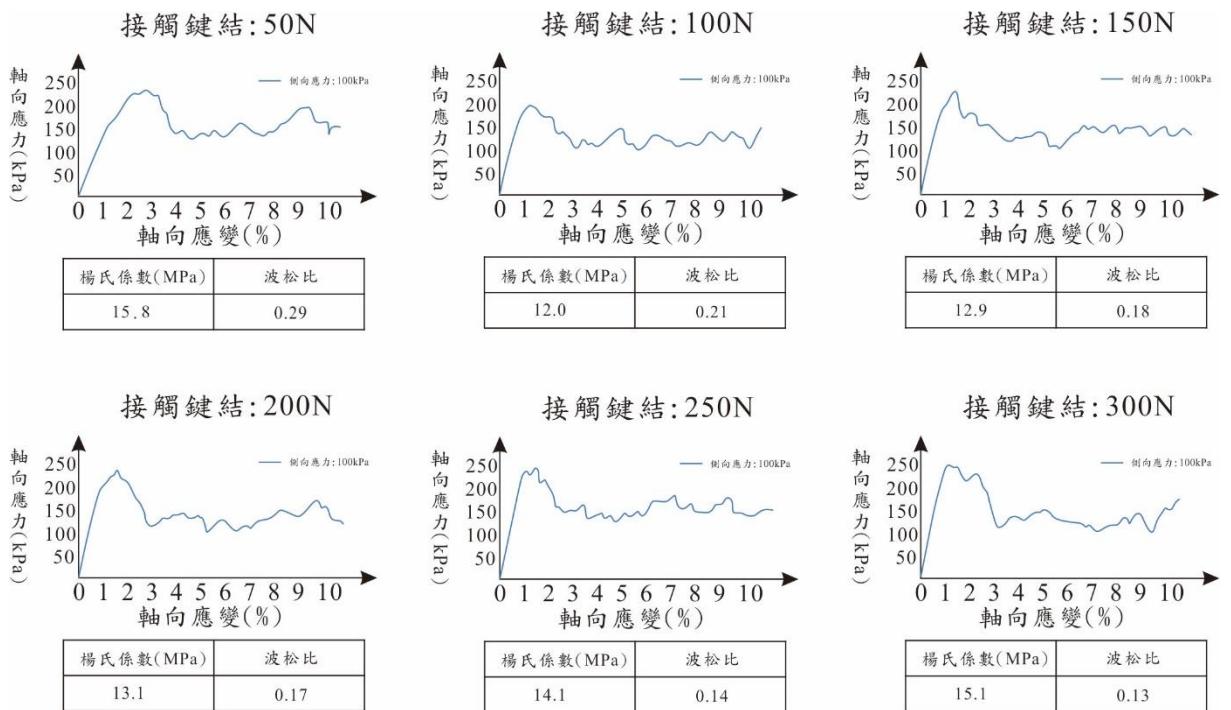


圖 4.7 粉砂質黏土層雙軸試驗結果。從中可以看見楊氏係數並無顯著變化，泊松比則有較顯著的變化。但凝聚力的變化與楊氏係數、泊松比並無線性相關之變化。

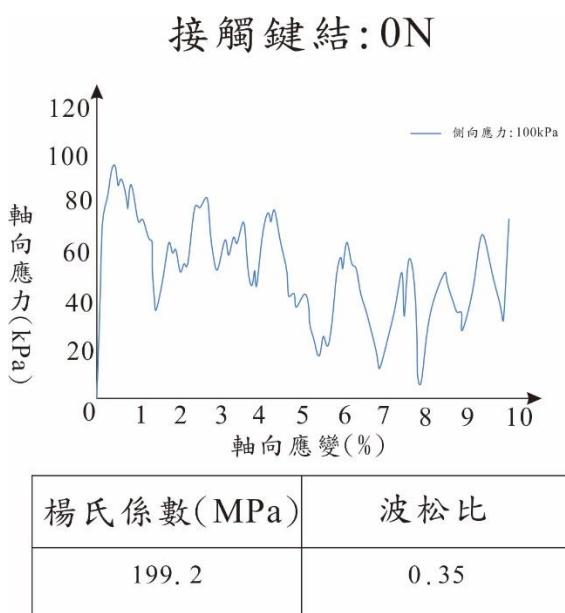


圖 4.8 碎石層雙軸試驗結果

第五章 竹山槽溝構造模擬結果

本章節利用第四章所建立起的 PFC^{2D} 微觀參數與巨觀參數建的關連，將能代表黏土層與礫石層的微觀參數投入於本章節對竹山槽溝的模擬中，改動研究流程中所列之可變參數，將模擬的結果與現實的槽溝，以及前人所做的回推剖面進行比較，以找出最符合竹山槽溝的模擬結果。

本研究黏土層的參數根據 Yang et al., (2014) 所彙整的資料，凝聚力在 11~70 kPa 之間，抗剪角在 20° ~ 42° 度之間，楊氏係數在 2 ~ 250 MPa 之間，泊松比在 0.1 ~ 0.5 之間。

本研究中將礫石層假設為由砂礫所組成的無凝聚力的土層，凝聚力設置為 0。其餘資訊彙整 Chang & Chen, (2014) 在台灣中部所做研究，抗剪角在 21° ~ 50° 度之間，楊氏係數在 185.7 MPa~ 1001.1 MPa 之間，泊松比在 0.28 ~ 0.41 之間。

在模擬中所黏土層與礫石層的微觀參數，藉由第四章的直剪試驗與雙軸試驗可以得到力學參數，這些力學參數的結果都必須在上述的黏土層與礫石層力學參數的範圍之內。

本研究將調整下列可變參數：斷層深度，黏土層凝聚力、摩擦角、楊氏係數、泊松比，礫石層摩擦角、楊氏係數、泊松比。

調整斷層所在深度的原因為，在竹山槽溝中，黏土層與礫石層皆為地表沉積層，斷層從堅硬岩類發展到地表土層後破裂面會產生分支擴散。由

於在竹山槽溝的開挖面中，並沒有展露整體礫石層的構造面，難以得知礫石層中的破裂面發展，礫石層中可能有部分的破裂為完整的破裂線。根據 Huang et al., (2016) 的調查推斷，竹山槽溝底下應有一條主要斷層，分之斷層為由此主斷層演育而來。因此調整斷層深度找出在哪一個深度下，主斷層能發展出兩條不同的分支斷層，切過褶皺。

5.1 節將說明模型的基本設置以及調整參數，5.2 節將展示調整上述可變參數的結果。

5.1 模型設置

模型的設置參照前幾章結所述，將模型設為兩層土層，分別為粉砂質黏土層與礫石層。粉砂質黏土層根據沉積單元以及 Huang et al., (2016) 所示，在前集集三次地震發生前粉砂質黏土層層厚為七公尺，所以將粉砂質黏土層厚度固定在七公尺厚。至於礫石層，根據槽溝附近的兩個鑽井資料結果顯示，厚度可能在七到十五公尺左右，因此調整礫石層的深度，尋找其演育發展最符合前人所推測的產生兩道分支斷層之結果。

為了使模型的結果能提供實際的力學試驗來驗證，本研究的模型參照 Chang (2013) 模擬砂箱試驗的大小，模型總長度為一公尺，模型的高度則因參數的調整而會有所不同，約在十三點七五公分至二十七點五公分之間。本研究所設定的重力為一般重力的八十倍，因此大小於實際上寬十四公尺、長四十公尺、深八公尺的槽溝大小並不同，根據Chang (2013) 所

示，在加倍重力的環境下，其厚度可視為在一般重力環境下加倍的厚度，即根據式（式5.1）：

$$P = \rho gh \quad (5.1)$$

在相同壓力下，重力的增加可視為厚度的增加。根據此理論，本研究將重力增加八十倍，因此模型的大小也視同在寬一百公尺，層厚在十一公尺至二十二公尺之間，如圖5.1所示。

根據 Chen, Mastsuta, & Yang. (2012) 所示，土層的沉積厚度會影響到斷層引致褶皺的演育，而根據圖 2.6 的鑽井資料顯示，槽溝底下大部分都由礫石層所組成，因此本研究加深沉積層厚度時，只調整礫石層厚度，分別以四公尺、八公尺、十五公尺厚進行模擬，斷層角度根據槽溝觀察到的角度以及可能的角度範圍，選擇在 20° 、 30° 、 60° ，用以尋找在斷層角度變化對斷層引致褶皺的影響。

此外，為了理解土壤層凝聚力的影響，本研究利用前章節凝聚力試驗模擬所得出之接觸鍵結與凝聚力的結果，選擇結觸鍵結在 50 N、150 N、200 N、250 N 作為變數進行模擬。

因此模型使用三個變數進行模擬，分別為斷層角度、礫石層厚度、粉砂質黏土層凝聚力大小。斷層錯距根據 Chen et al., (2007) 調查出前集集地震三次的古地震事件時斷層的垂直錯距，設定為三點六公尺高。模擬的結果將與前人回推剖面中，前集集地震三次的古地震事件的構造進行對比。

模型的結果如圖 5.1 (b) 所示。

由於我們無法得知在前集集地震三次的古地震發生時，槽溝的確實地質狀況，根據前人回推剖面所得出的共識，前集集地震三次的古地震發生時，槽溝只呈現褶皺翼部無倒轉的單斜構造，破裂跡並無延伸至粉砂質黏土層，本研究將以這兩點作為依據，並已實際的鑽井資料為依據，尋找出可能符合當時竹山槽溝狀況的地質條件。

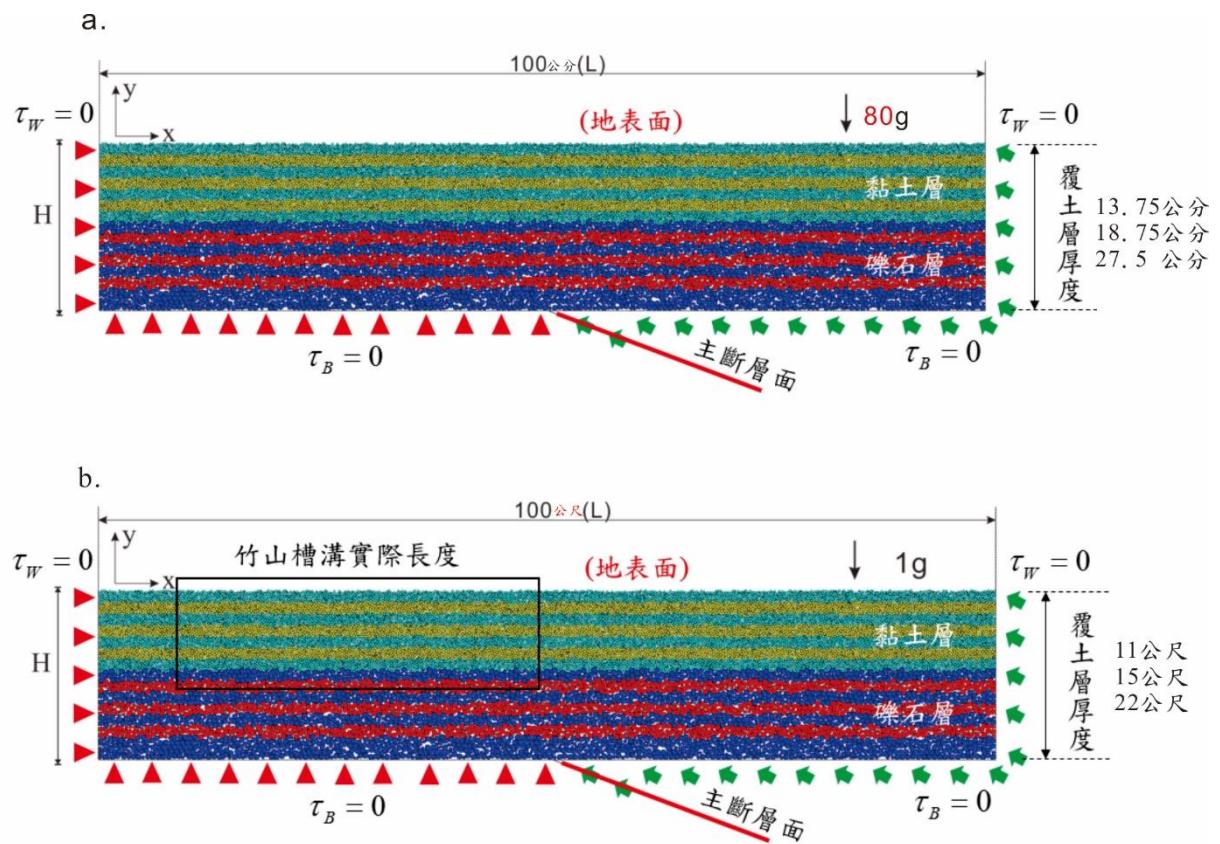


圖 5.1 斷層模擬模型設置圖。a.為本研究模擬參數實際設定，重力為一般重力的 80 倍，試體長度、寬度的單位公分。b.為經由公式轉換後，試體所模擬的長度與寬度，轉換後的大小於實際竹山槽溝長度的比較如圖 b.的黑色框框所示。

5.2 黏土層凝聚力、覆土層厚度、斷層角度變化模擬結果

模擬的結果根據不同的參數進行分類。本研究針對三個地質條件：黏土層強度、基底斷層深度、基底斷層角度進行調整，總共有 27 組結果。結果如下圖 5.3、5.4、5.5 所示。青色、綠色代表黏土層，藍色、紅色代表礫石層，每一個組結果皆有相同的垂直錯距，但斷層的角度會影響到側向的壓縮量，因此不同的角度下，側向長度並不相同。

各圖的呈現方式為在相同凝聚力下，以 x 軸為斷層角度變化軸、y 軸為斷層深度變化軸。從圖 5.3、圖 5.4、圖 5.5 變化中，可以看出凝聚力對於結果的影響。

調整這些參數的目地為找出在合理的條件下，黏土層產生單斜構造的條件，所有結果的分析將會在下一章討論。

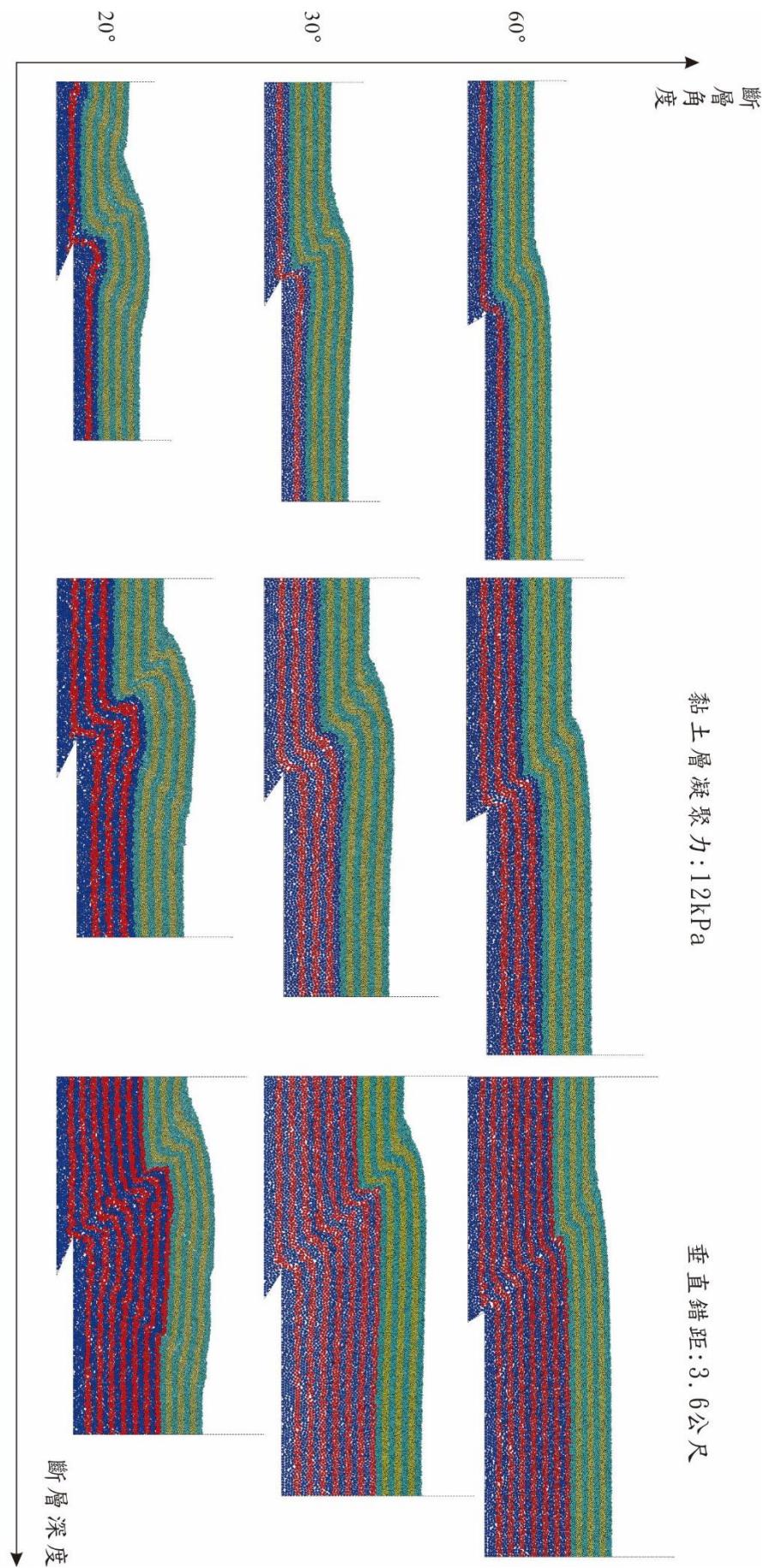


圖 5.2 凝聚力 12kPa 與垂直錯距 3.6 公尺下，變化斷層角度與深度結果

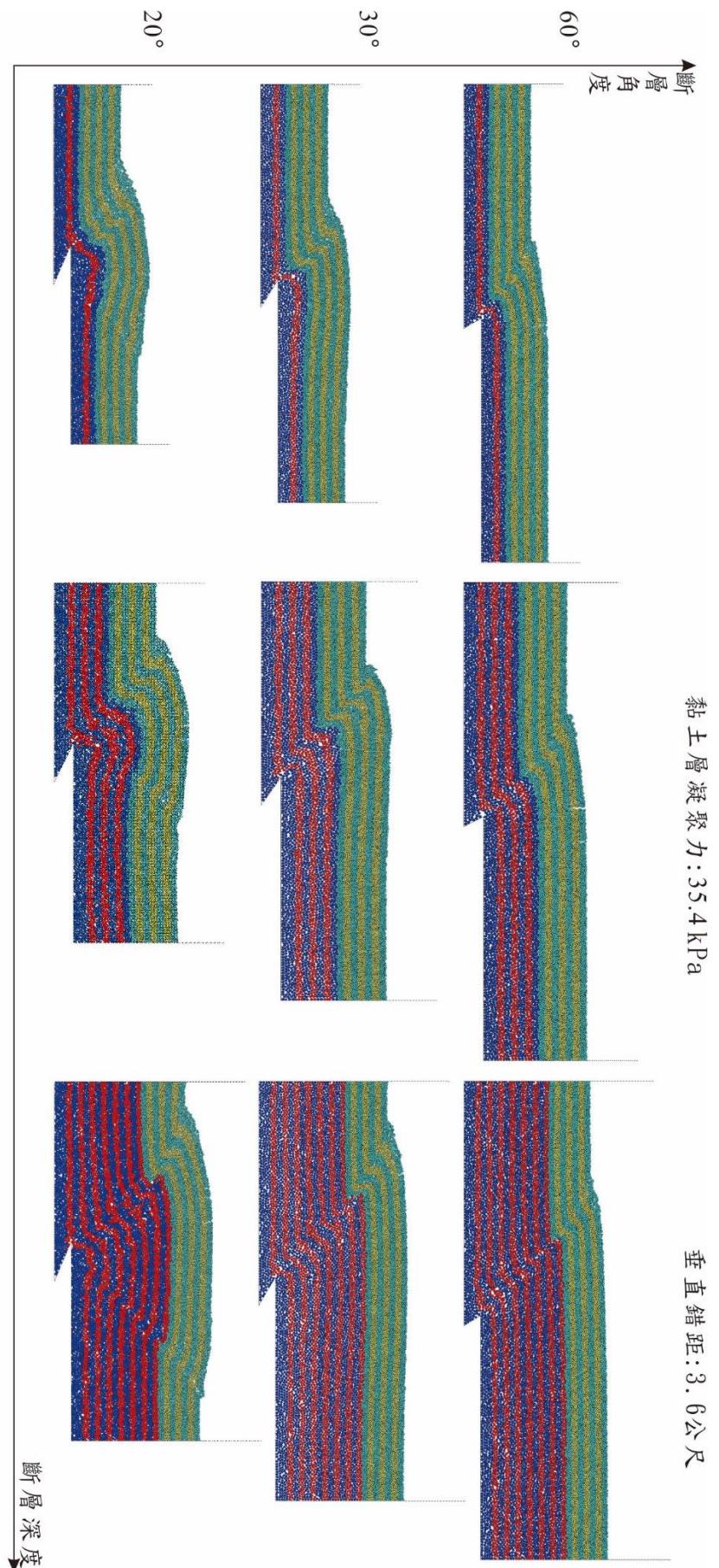


圖 5.3 凝聚力 35.4 kPa 與垂直錯距 3.6 公尺下，變化斷層角度與深度結果

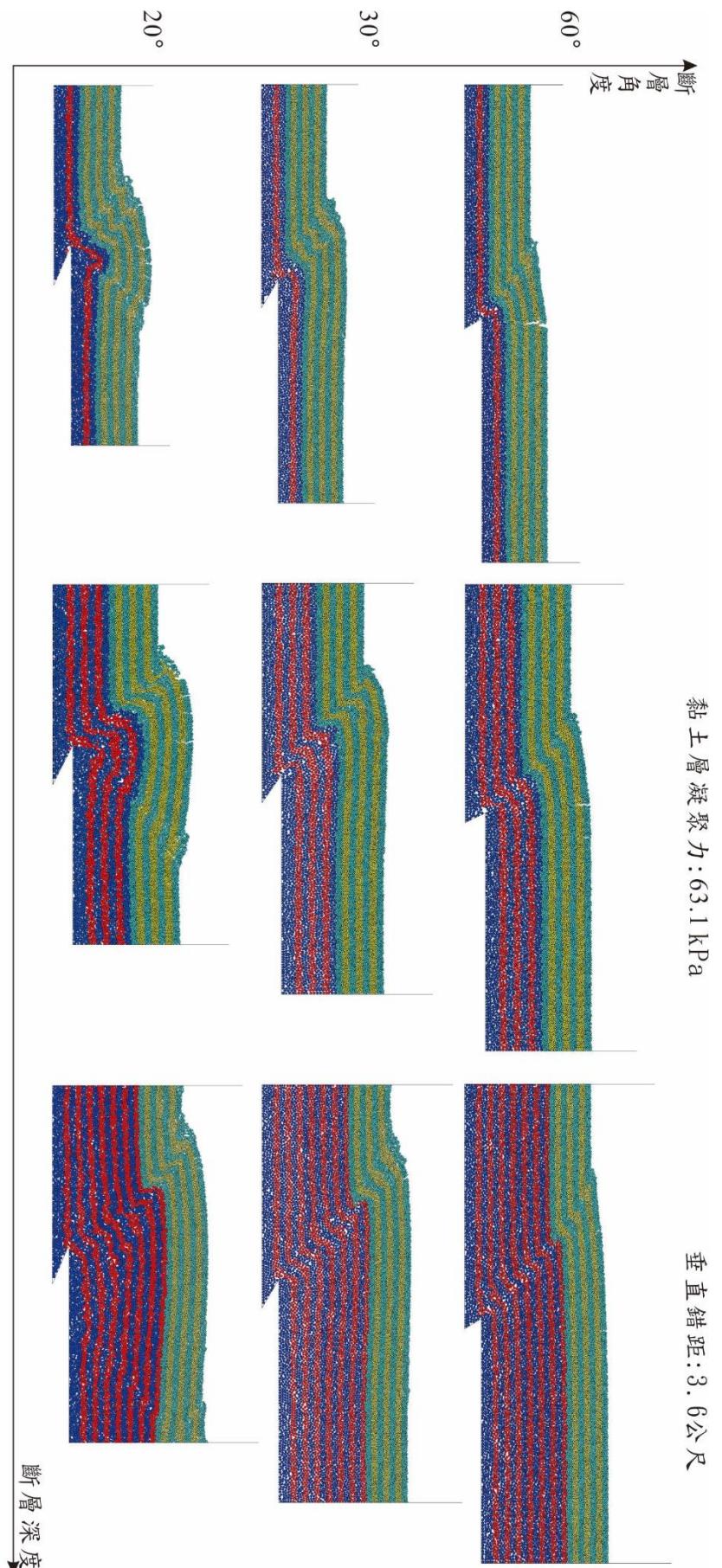


圖5.4 凝聚力63.1 kPa與垂直錯距3.6公尺下，變化斷層角度與深度結果

第六章 討論

6.1 黏土層凝聚力、覆土層厚度、斷層角度變化之影響

從單從圖 5.2、圖 5.3、圖 5.4 各圖來看，可以發現斷層角度與深度對於土層變形與其變形範圍皆有顯著影響。接下來將會針對不同凝聚力下的結果進行討論。從凝聚力在 12 kPa 下，即圖 5.2 中可以發現，無論斷層深度多深，斷層角度在 20、30、60 的表現皆有所不同。斷層角度在 20 度的，無論斷層厚度多少，黏土層下的礫石層皆有明顯隆起抬升，擠壓黏土層，使黏土層在的褶皺出現翼部倒轉的情況。翼部倒轉的情況即使在現今的竹山槽溝中出現，所以這個結果不符合實際竹山槽溝的情況。同時，不論土層厚度、凝聚力的變化，斷層角度在 20 度時皆出現反向褶皺的形貌。

翼部倒轉、反向褶皺的情況在斷層角度在 30 度時即消失，斷層角度在 30 度之後，皆無產生與主斷層反向的褶皺變形。在斷層角度為 60 度時礫石層的變形更為趨緩，使得上覆黏土層變形行為更趨緩的單斜構造。變形的區域相較於斷層角度為 30 度時較小，而且礫石層變形的區域也較集中。在斷層角度為 60 度下，無論哪一個斷層深度下黏土層所產生的單斜構造與前人回推剖面中的純單斜構造十分接近，但根據鑽井資料結果顯示，槽溝深部不變形的主斷層角度為 24 度，且主斷層會有產生兩道分支斷層的趨勢，這些都沒有在斷層角度為 60 度的結果中觀察到。而槽溝上

觀察到的錯動量最大的主斷層跡往下延伸，北牆的主斷層角度大約在 20 到 24 度之間，南牆的主斷層角度為 32 度，皆遠小於 60 度，所以此角度並不符合實際觀察的結果。

從斷層角度在 20 度、30 度、60 度的變化下可以得知，斷層角度越大，土層的變形就越趨緩，對地表的影響越不明顯；當斷層角度越小，由其是在 20 度時，會產生反向的褶皺，容易對地表產生大範圍的變形，斷層角度在 30 度之下的變形趨於平緩，只在主斷層附近造成變形。斷層角度在 20 與 30 度的變化剛好與實際在槽溝中所觀察到的主斷層角度的變化接近，而兩個角度在相同的地質條件下變形的構造結果卻截然不同，可知影響竹山槽溝構造演育十分可能來自於底下不變形的主斷層角度不同的影響。

隨著斷層深度增加，礫石層遭受下伏斷層截切影響越來越顯著，圖 6.1 為凝聚力為 35.4 kPa ，斷層角度為 30 度，斷層深度從 11 公尺到 22 公尺的結果。從結果中可以看出礫石層在 22 公尺時明顯遭到截切，越接近主斷層變形越趨於褶皺的行為。這由於礫石層並無鍵結，在受到斷層截切時顆粒與顆粒間的碰撞與摩擦消耗大部分截切礫石層所產生的力，可以看見越接近基底斷層時礫石層間的孔隙就越明顯，這些行為使得接近基底斷層的礫石層以變形為主，而越接近黏土層的礫石層，受到的力越小且越一致，皆以固定相同的速度與角度移動，且遇到上覆有鍵結的黏土層，顆粒

無法以移動的方式消散，只能破壞黏土層的鍵結，朝無鍵結的方向消散力，於是此區域的力變得集中，便越傾向以截切黏土層而非用自身的變形消散基底斷層產生的力。

而黏土層在斷層深度為 11 公尺時，模型左側的黏土層出現與主斷層相反方向的褶皺，可能是由於斷層剪切的方向太接近模型邊界，使得模型邊界受力後產生反向推力，的反作用力與推力相互推擠而產生此褶皺。

除了由於邊界所造成的結果之外，其他斷層角度、斷層深度對於黏土層褶皺的影響，在凝聚力變大的情況下也能夠觀察得到，代表著斷層角度、斷層深度對地表變形的影響性有其獨立性，而非與其他參數相關。

至於凝聚力強度的變化，從圖 5.2、圖 5.3、圖 5.4 中可以看出，黏土層凝聚力增強，地表面越容易出現裂隙，褶皺曲線便得更激烈，在凝聚力為 12 kPa 情況下，黏土層出現無倒轉的純單斜構造，而在凝聚力在 44 kPa 的情況下，斷層角度在 60 度，20 度的情況下地表皆出現明顯的張裂隙，而且褶皺形貌與凝聚力 12 kPa 的結果相比變形得十分強烈，但大部分的褶皺都出現翻轉的現象。根據粘為東 (2014) 提供的理論，將離散元素法的顆粒中心是為網格點，將四點可形成矩形的點視為一個矩形，記錄矩形的變化，再利用 Ramsay (1967) 的計算矩變形化得出每一個階段的應變量，並用顏色在 PFC^{2D} 中顯示出來。結果如圖 6.2 所示，為斷層角度 20 度，覆土層厚度為 22 公尺，凝聚力為 35.4 kPa 的情況，垂直抬升量增加後應變

變化。從中可以發現，當變形開始時，應變並非從底部發展到頂部，而是從頂部與底部開始，最終在中間相連。

利用粘為東 (2010) 提供的方法，可以看出潛在的變形行為。如圖 6.3 所示，將凝聚力為 12 kPa 下，覆土層厚度為 15 公尺，斷層角度為 20 度，30 度，60 度的變形結果拿來比較，可以發現到，無論是 20 度、30 度、60、在主斷層反向處皆出現變形行為，但只有在斷層角度為 20 度的時候才較能從結果看出。

從先前的調整的條件可以發現，要產生單斜構造，必須要在凝聚力在 12 kPa 的結果才會出現，凝聚力在 35.4 kPa 之後，黏土層在 30 度的情況下也會產生褶皺倒轉的現象，因此不符合前人回堆之結果。

而斷層深度會影響複數破裂機的產生。根據圖 5.2 所示，固定凝聚力在 12 kPa，斷層角度在 20 度跟 30 度的情況，可以觀察道以下的結果：當斷層深度在 11 公尺時，能看出一道破裂線從主斷層處演育；當斷層角度在 15 公尺時，能看到褶皺處有兩道的破裂演育；當斷層角度在 22 公尺時，主斷層處演育發展出一道完整的彎曲破裂線。除了在斷層深度在 15 公尺的情況外，其於深度皆無法產生兩道破裂。因此合理推斷斷層深度在 15 公尺的情況下最符合竹山槽溝的狀況。

因此在模擬中固定了凝聚力強度為 12 kPa、斷層深度在 15 公尺。根據 Chen et al., 2007 的鑽井資料結果顯示，主要的斷層角度可能在 24 度之

間。由於在斷層角度為 20 度的情況下的結果皆不符合實際竹山槽溝的情況，而在 30 度之後的結果能產生純單斜構造，根據模擬結果與鑽井資料，本研究調整斷層角度在 20 度到 32 度之間粉砂質黏土層的土層變形形貌，結果與討論放在 6.2 節中。

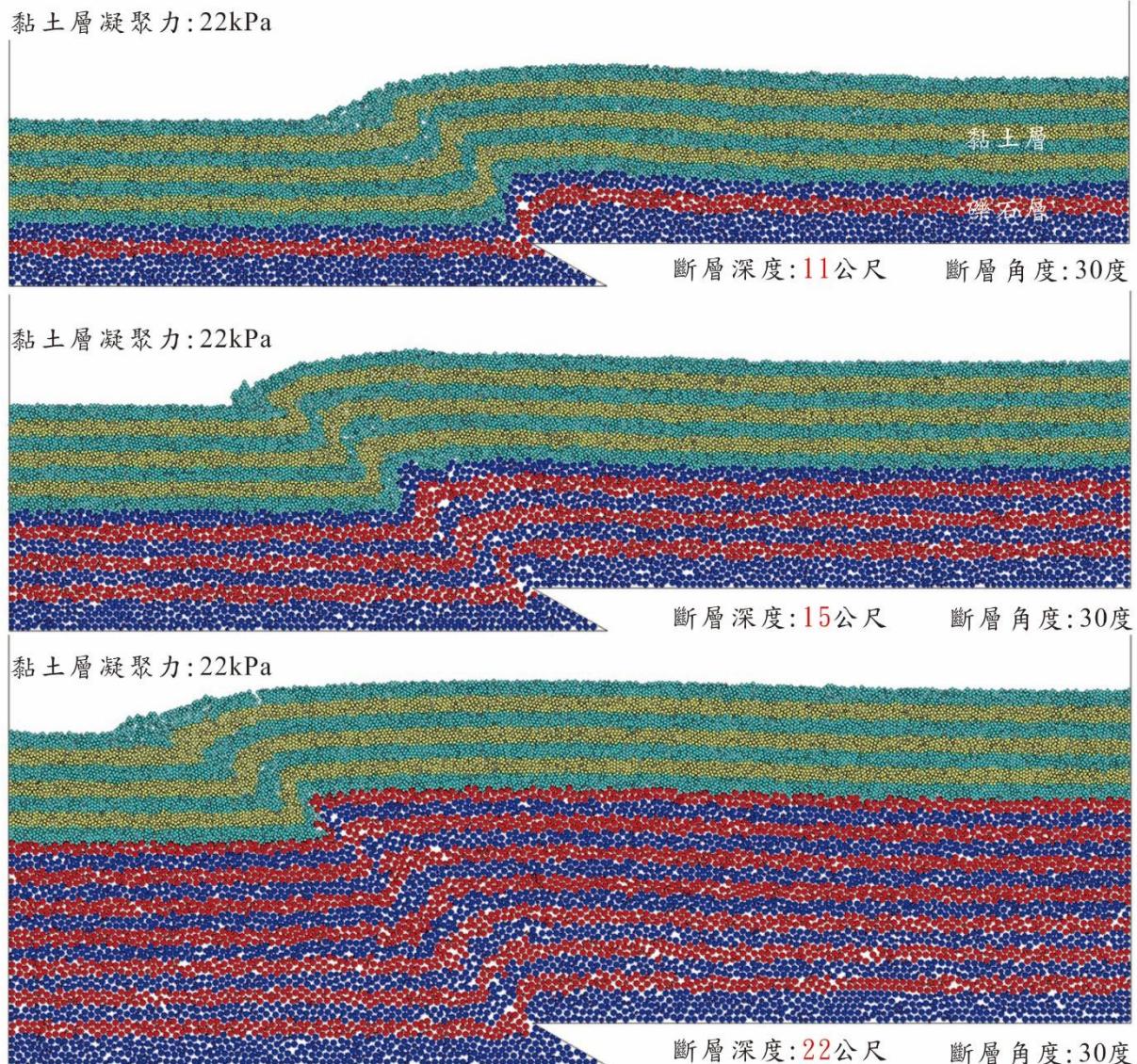


圖 6.1 凝聚力為 35.4 kPa，斷層角度為 30 度下，覆土層厚度從 8 公尺、15 公尺、22 公尺下結果。從圖中可以清楚的發現，斷層深度越深，地表變形的位置越沿著斷層錯動的水平方向移動。礫石層隨著深度增加，演育結果

也有所不同。礫石層頂部在深度為 11 公尺的情況下褶皺翼部垂直，但褶皺兩翼夾角大於九十度；在深度為 15 公尺時，褶皺夾角開始趨近垂直甚至倒轉；在斷層角度為 22 公尺時，褶皺夾角小於九十度。

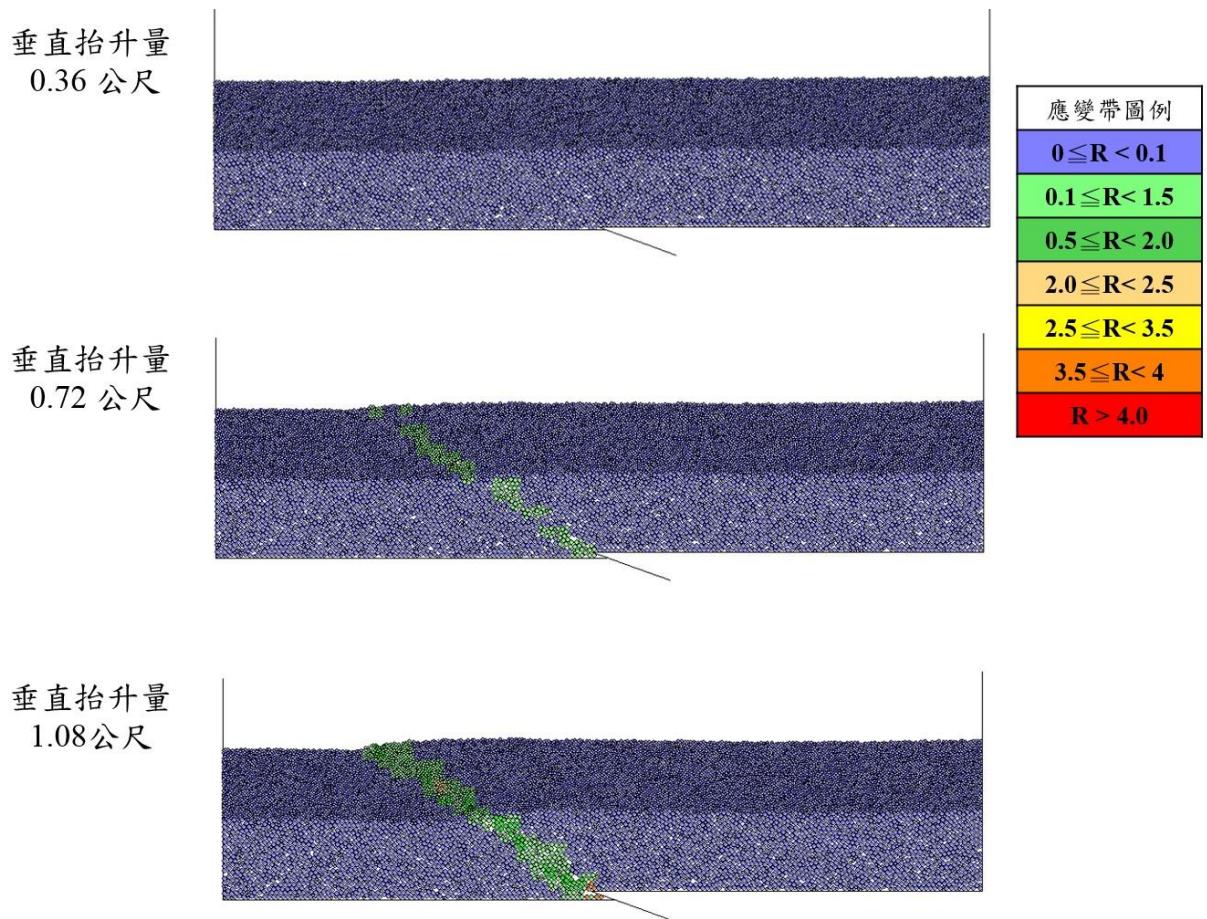


圖 6.2 斷層角度 20 度，覆土層厚度為 15 公尺，凝聚力為 35.4 kPa 的情況，垂直抬升量增加後剪應變變化。當垂直抬升量到達 0.72 公尺時，即產生應變，而應變並非從礫石層開始向上演育，而是從黏土層與礫石層一起演育。R 為網格所計算之應變橢圓率，為每個網格中紀錄的橢圓的長軸除上短軸。

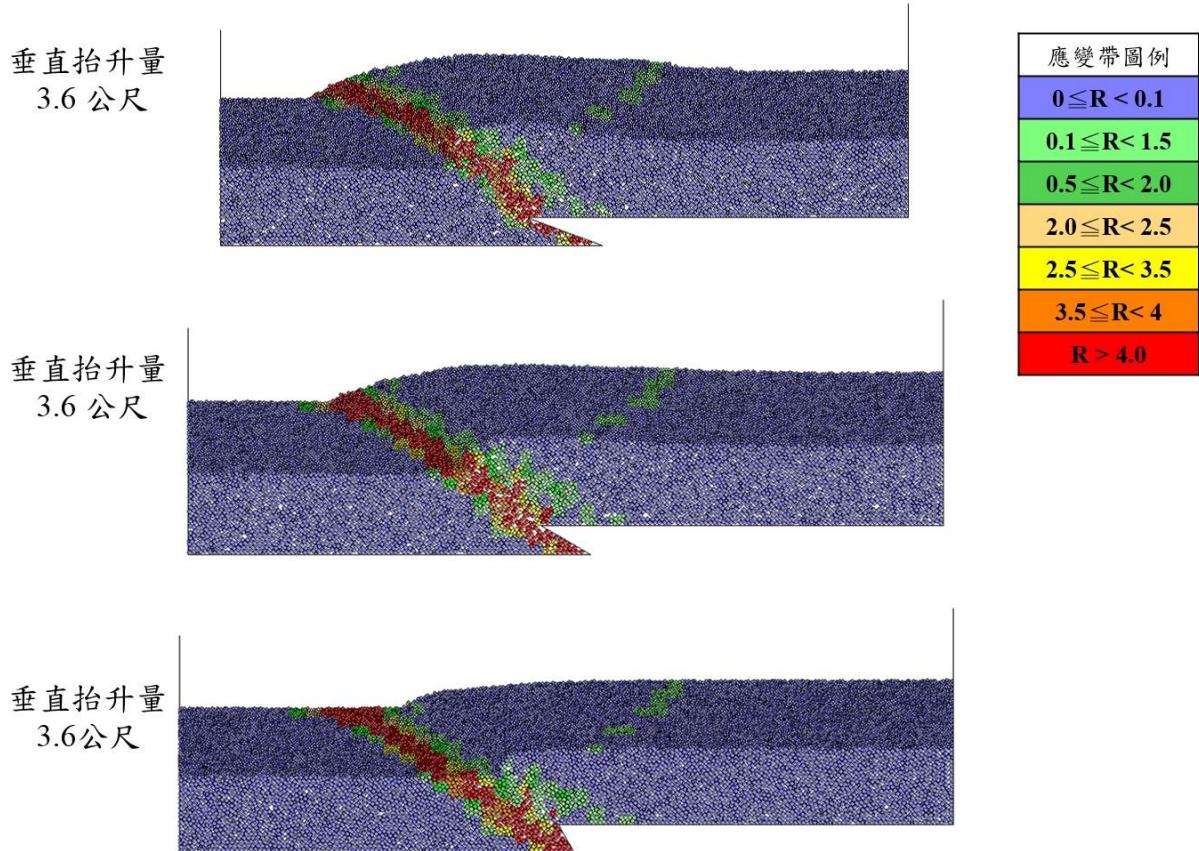


圖 6.3 凝聚力在 35.4 kPa 的情況下，覆土層厚度為 15 公尺，垂直抬升量為 3.6 公尺下，斷層角度 20 度、30 度、60 度的應變變化。從圖中可以看出，無論斷層角度多少，皆出現一條與主斷層方向相反的應變帶。R 為網格所計算之應變橢圓率，為每個網格中紀錄的橢圓的長軸除上短軸。

6.2 模擬結果與現今竹山槽溝結果比較

從 6.1 節中可以得知，要在垂直錯距為 3.6 公尺的條件下，斷層角度在 20~30 度左右讓黏土層演育出單斜構造，只有在凝聚力在 12 kPa 的情況下會出現；而斷層深度只有在 15 公尺時，主斷層才較容易演育出分支斷層。

因此固定凝聚力在 12 kPa、斷層深度在 15 公尺下，調整斷層角度，尋找能夠產生單斜褶皺最低角度，並且觀察斷層小角度變化對於黏土層褶皺之影響。

結果顯示，在斷層角度最低在 24~32 度時，都能出現純單斜構造，如圖 6.4 所示，斷層角度為 32 度時，也出現純單斜構造，且能從中看出角度變化對結果的影響，若改變顆粒的強度後，可更明顯看出斷層角度對黏土層褶皺變形形為影響，以下以黏土層顆粒參數 $K^n = 1 \times 10^7 N/m$ 、 $K^n/K^s = 2.5$ 、 $\rho = 2420$ 、顆粒摩擦力 = 0.73，礫石層 $K^n = 1 \times 10^8 N/m$ 、 $K^n/K^s = 0.3$ 、 $\rho = 1884$ 、顆粒摩擦力 = 0.73 的結果，此時的黏土層凝聚力照 4.1 章的流程與設定，結果為 11 kPa。結果如圖 6.4 所示。斷層角度 24 度時，在前集集地震三次的古地震後形成尖狀、尖端擠入粉砂質黏土層的底部，並有向粉砂質黏土層的褶皺背斜褶處繼續推擠的趨勢，接近南牆的構造。

圖 6.5 中可以發現，不同的斷層角度下，黏土層底下的礫石層變形形

貌有顯著不同，而斷層角度在 24 度時，黏土層形成純單斜構造，而礫石層已擠入黏土層中，並截切黏土層底部的向斜軸處；斷層角度在 32 度時，礫石層在黏土層下還形成平滑的曲面，黏土層也呈現出單斜構造，但黏土層接近 unit 4 的土層已在向斜軸處被截切。

從圖 6.6 將模擬結果與現今槽溝結果比較可以發現，斷層角度在 24 度時的礫石層演育趨勢與北牆上的構造位置相同；在斷層角度為 32 度時，黏土層破裂的位置與現今觀察到的南牆截切的位置相同。從此結果我們可以合理推斷，斷層角度為 24 度時，可能為北牆底下的主斷層角度；斷層角度在 32 度時，可能為南牆下主斷層角度。

圖 6.7 為斷層角度為 24 度時的演育圖，圖 6.8 為斷層角度在 32 度時的演育圖。從圖中可以看出，在斷層角度為 24 度時，礫石層主要受到側向應力的推擠，使得礫石層推擠黏土層的底部，並開始截切褶皺的向斜軸處；在斷層角度為 32 度時，礫石層主要受到抬升的力量控制，使得礫石層傾向向上推擠，在黏土層下產生平滑曲面，但由於力主要來自於垂直向，因此破裂的方向也傾向垂直向，因此黏土層中的褶皺在背斜軸處出現明顯的破壞。

在凝土層凝聚力為 11 kPa 的情況，斷層深度為 15 公尺時，斷層角度在 24 度與 32 度皆為竹山槽溝底下主斷層面可能的角度，而且只有 8 度的微小變化，也同樣的可以產生出前人回推剖面所推論的單斜構造。但從模

擬結果中可以看出，8 度的差異下，整個演育的趨勢卻有顯著的差異，這些差異的趨勢與現今在竹山槽溝所觀察到的結果相符。因此本研究認為，北牆底下的主斷層角度可能與南牆不同，北牆主斷層角度可能為 24 度，南牆的斷層角度可能為 32 度。

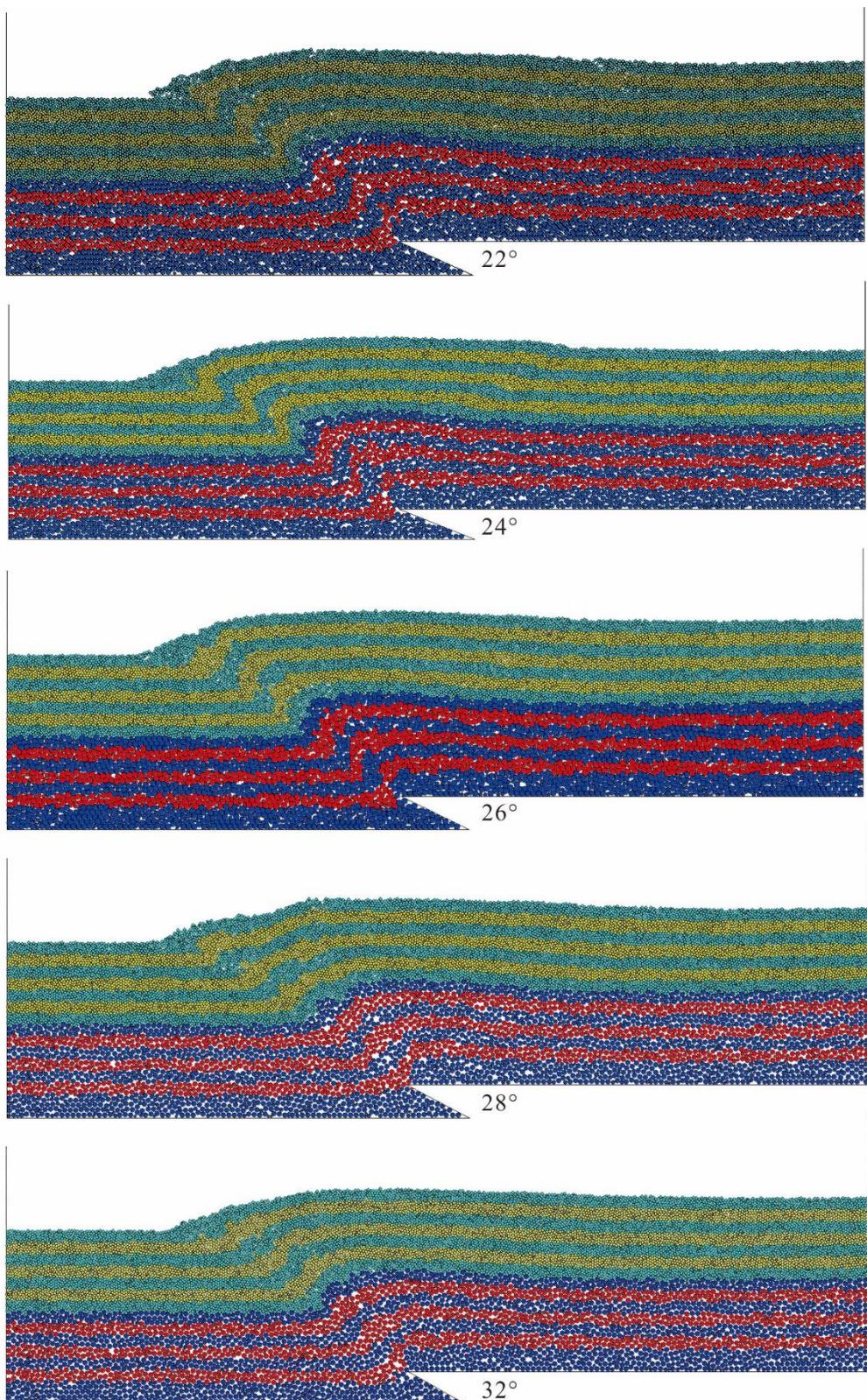


圖 6.4 垂直錯距 3.6 公尺下，斷層角度 22~32 度的結果。可見從 26 度後形成翼部沒有倒轉的純單斜構造。

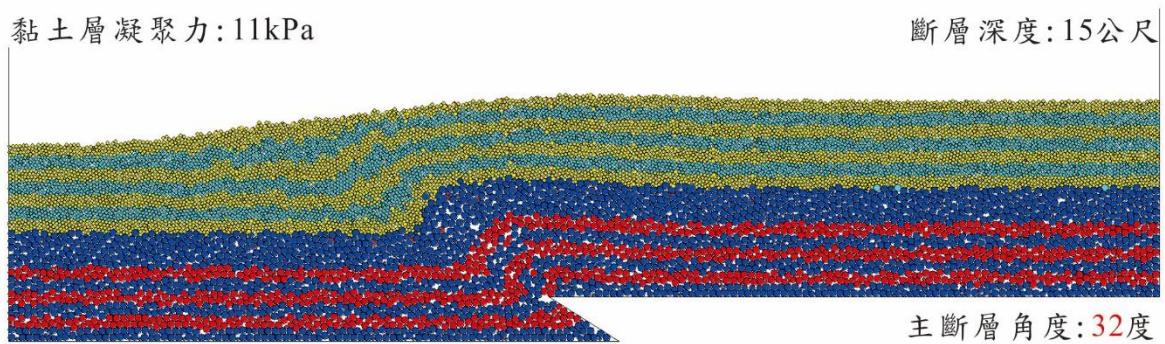
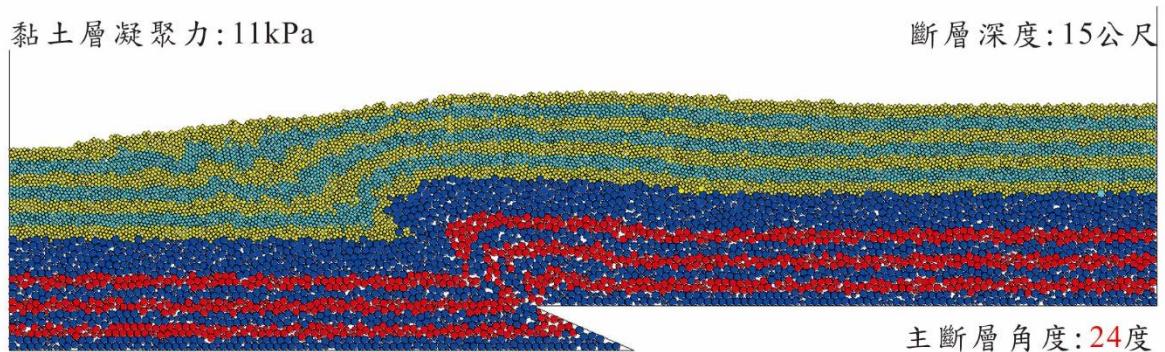


圖 6.5 凝聚力 11 kPa、斷層深度 15 公尺，主斷層角度為 24 度與 32 度之結果。從礫石層形貌可以明顯區別出兩個結果的差異。兩個結果上黏土層皆呈現單斜構造，但變形的趨勢，構造主要演育的方向卻有明顯的不同。

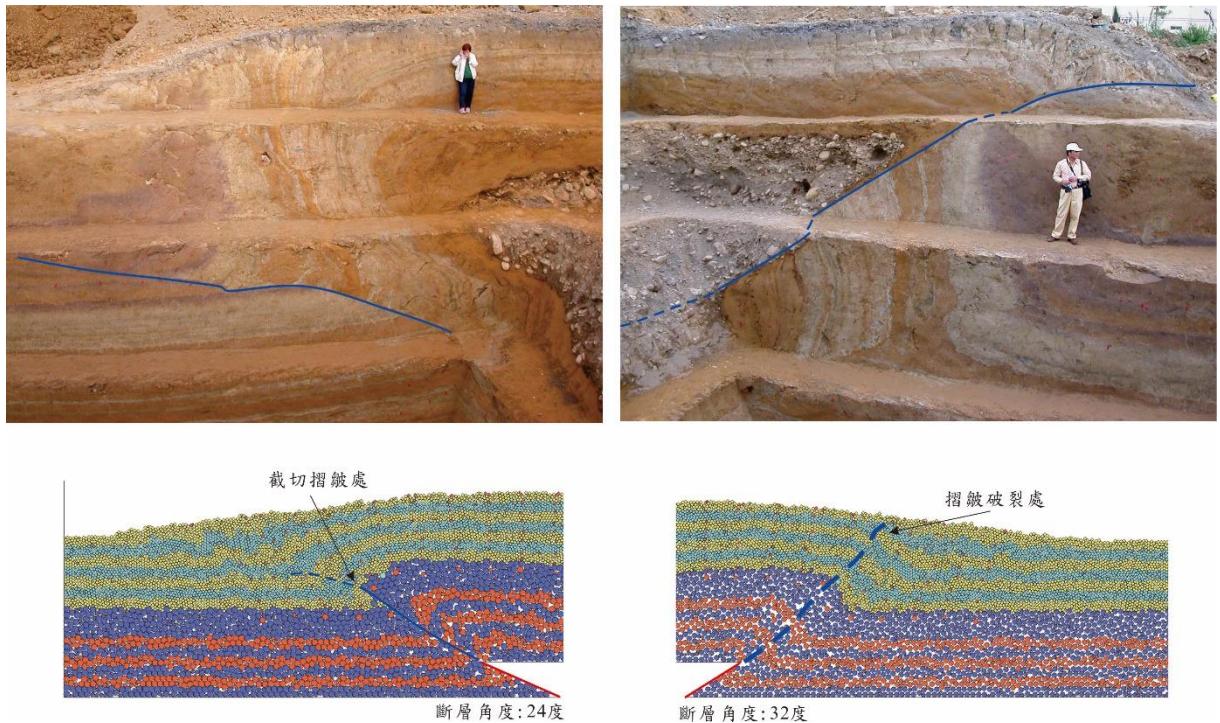


圖 6.6 模擬結果與現今構造剖面比較。藍線為主斷層線截切線，虛線為斷層演育可能發展的趨勢。紅線為主斷層線。斷層角度為 24 度時，礫石層有一條明顯的截切面，切過黏土層褶皺的背斜軸處；斷層角度為 32 度時，礫石層並無明顯的截切面，但黏土層褶皺的背斜軸處已經受到截切。

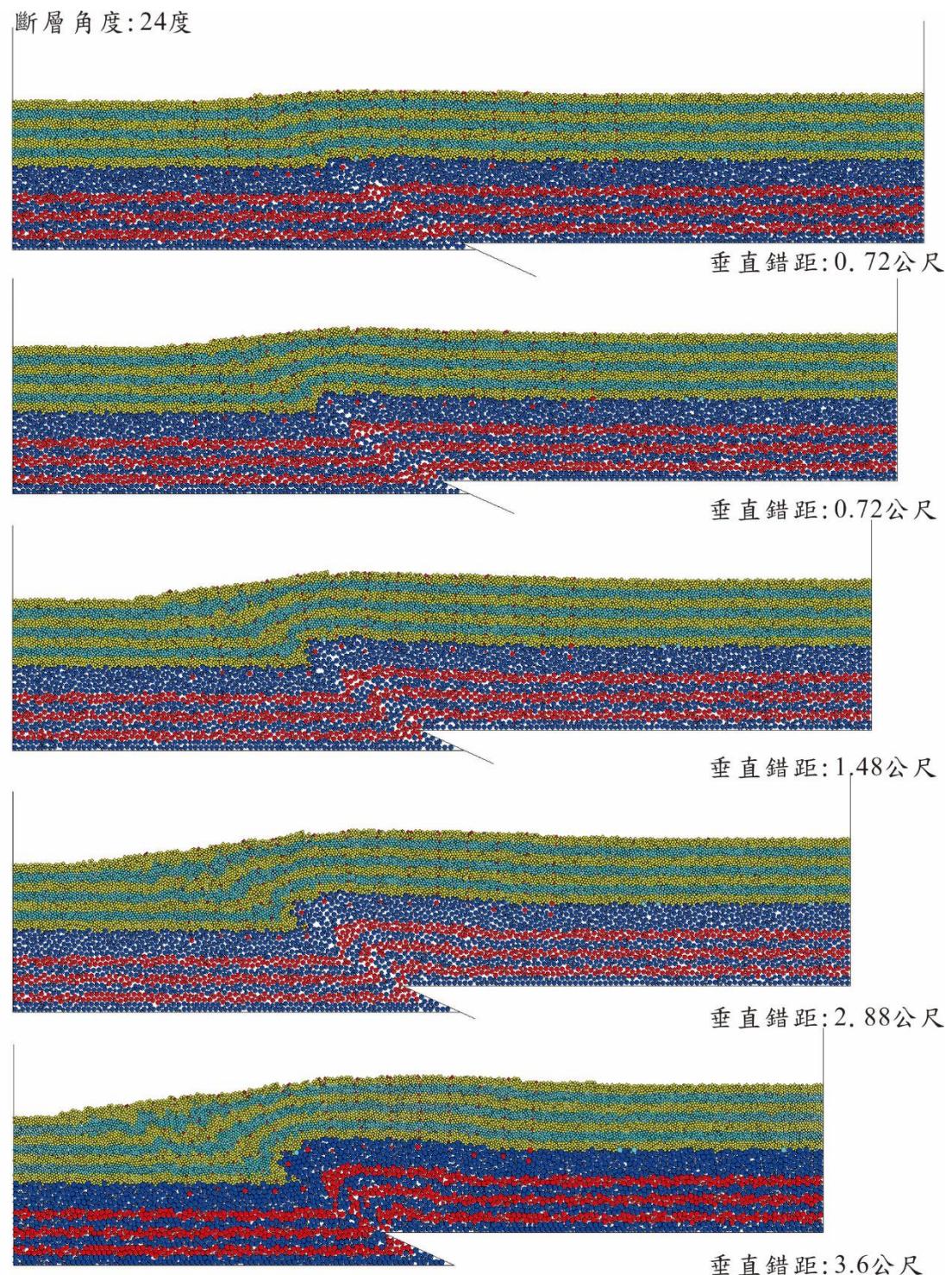


圖 6.7 斷層角度在 24 度下，斷層演育至垂直錯距 3.6 公尺之結果。從圖上可以看見，褶皺變形處主要出露在褶皺背斜軸以及下盤處。黏土層在垂直錯距為 1.48 公尺時受到截切。而礫石層開始向側向移動。

斷層角度:32度

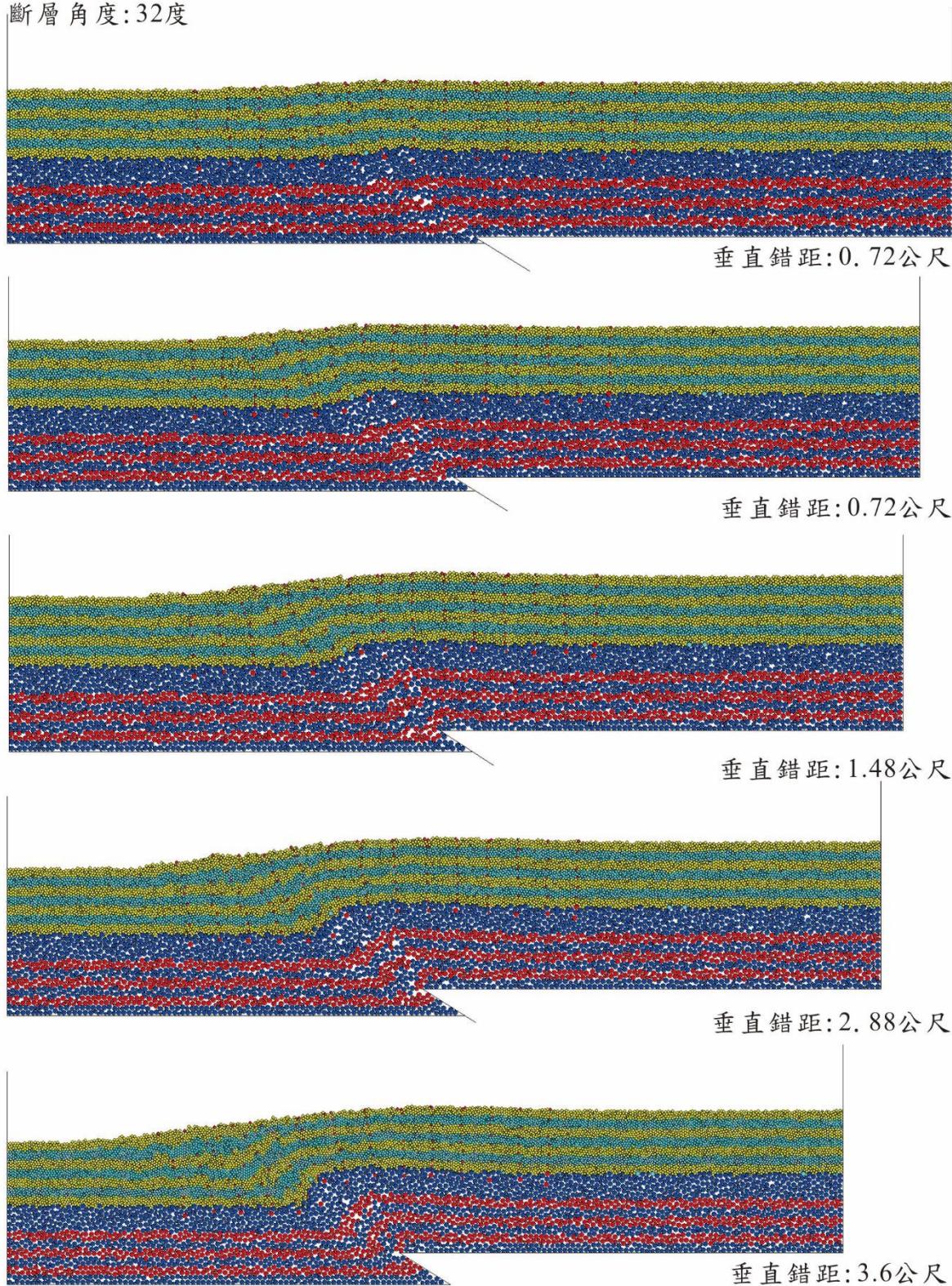


圖 6.8 斷層角度為 32 度下，斷層錯距演育之結果。可以看見在垂直錯育在 2.88 公尺開始，黏土層已開始截切，在 3.6 公尺則時完全被截切。

第七章 結論

從模擬的結果可知，在合理的斷層角度與斷層深度下，只有在凝聚力於 11~12 kPa 的情況才容易產生單斜構造，在凝聚力大於 11~12 kPa 的情況下，在凝聚力為 35.4kPa 時，黏土層的褶皺都以褶皺倒轉構造為主，並不符合前人推測此時期出現的單斜構造。

因此模擬結果顯示，若要產生單斜構造，必須要在凝聚力為 11 kPa 的情況下才容易形成，將此凝聚力數值及前人所蒐集的資料比較發現，凝聚力 11 kPa 為黏土層凝聚力的最低值，因此，本研究顯示，只有在凝聚力較低的形況下才容易形成單斜構造。

調整斷層角度的結果顯示，斷層角度在 20 度時，褶皺皆出現反向褶皺，且沿著斷層演育方向形成的褶皺大部分為倒轉褶皺，與實際上槽溝觀測的結果不同，在斷層角度為 30 度時黏土層沿著斷層演育方向形成的褶皺較不容易出現反轉褶皺，並容易形成單斜構造。根據模擬的結果，在斷層角度為 24 度時黏土層沿著斷層演育方向形成單斜構造，因此，在凝聚力為 11 kPa 的情況下，斷層角度要大於 24 度才容易形成單斜構造。

斷層角度在 24 度與 32 度皆產生前人所推測的單斜構造，而 24 度的演育表現與結果與槽溝北牆所見之構造相似；32 度的演育表現與槽溝南牆所見之構造相似，因此可以合理推斷，槽溝南牆與北牆構造異化可能來自於底部主斷層角度不同。而在演育過程中，北牆主要受到側向應力的擠壓而

截切黏土層褶皺的背斜軸處；南牆主要受到垂直抬升的應力，使得黏土層褶皺背斜軸處容易受到破壞，因此演育產生異化。

因此，斷層演育過程中，即使斷層角度只有八度的變化，其構造演育結果也會有所不同，說明即使是小角度的斷層變化對於演育結果也有顯著影響。

參考文獻

- Allmendinger, R. W., “Inverse and forward numerical modeling of trishear fault-propagation folds. ” Tectonics, **17**(4): 640-656, 1998.
- Chang, K. T. and Cheng, M. C., “Estimation of the shear strength of gravel deposits based on field investigated geological factors. ” , Engineering Geology, **171**: 70-80, 2014
- Chang, Y. Y., Lee, C. J., Huang, W. C., Huang, W. J., Lin, M. L., Hung, W. Y. and Lin, Y. H., “ Use of centrifuge experiments and discrete element analysis to model the reverse fault slip. ” , International Journal of Civil Engineering, **11**(2): 79-89, 2013.
- Chen, W. S., Yang, C. C. and Matsuta, N., “Characteristics of Coseismic Thrust-Related Folding from Paleoseismic Investigation Responsible for the 1999 Chi-Chi Earthquake of Central Taiwan ” . Earthquake Research and Analysis - Seismology, Seismotectonic and Earthquake Geology, 2012.
- 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. and Lin, W. H., “Late Holocene paleoseismicity of the southern 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, 2007.
- Cole Jr, D.A. and Lade, P.V., “Influence zones in alluvium over dip-slip

- faults. ” , Journal of Geotechnical Engineering, **110**(5): 599-615, 1984.
- Cundall, P. A., “ Rational Design of Tunnel Supports: A Computer Model for Rock Mass Behavior Using Interactive Graphics for the Input and Output of Geometrical Data” , DTIC Document, 1974.
- Cundall, P. A. and Strack, O. D., “A discrete numerical model for granular assemblies” . Géotechnique, **29**(1): 47-65, 1979.
- Finch, E., Hardy, S. and Gawthorpe, R., “Discrete element modelling of contractional fault-propagation folding above rigid basement fault blocks. ” , Journal of Structural Geology, **25**(4): 515-528, 2003.
- Hardy, S. and Finch, E., “Discrete element modelling of the influence of cover strength on basement-involved fault-propagation folding. ” , Tectonophysics, **415**(1): 225-238, 2006.
- Huang, W. J., Chen, W. S., Lee, Y. H., Yang, C. C., Lin, M. L., Chiang, C. S., Lee, J. C. and Lu, S. T., “ Insights from heterogeneous structures of the 1999 Mw 7.6 Chi - Chi earthquake thrust termination in and near Chushan excavation site, Central Taiwan. ” , Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2015.
- Huang, W. J., “Deformation at the leading edge of thrust faults” , Purdue University, Thesis of PhD, 2006.
- Itasca Consulting Group, Inc, Particle flow code in 2 dimensions, Version 3.0, Theory and Background. Itasca Consulting Group, Inc. Minneapolis,

Minnesota, U.S.A, 2002.

Johnson, K. M. and Johnson, A. M., “ Mechanical analysis of the geometry of forced-folds. ” , Journal of Structural Geology, 24(3): 401-410, 2002a.

Johnson, K. M. and Johnson, A. M., “Mechanical models of trishear-like folds. ” , Journal of Structural Geology, 24(2): 277-287, 2002b.

Lade, P. V., Cole Jr, D. A. and Cummings, D., “Multiple failure surfaces over dip-slip faults. ” , Journal of Geotechnical Engineering, 110(5): 616-627, 1984.

Ota, Y., Chen, Y. G. and Chen, W. S, “Review of paleoseismological and active fault studies in Taiwan in the light of the Chichi earthquake of September 21, 1999. ” , Tectonophysics, 408(1): 63-77, 2005.

Potyondy, D. and Cundall, P., “A bonded-particle model for rock.” , International journal of rock mechanics and mining sciences, 41(8): 1329-1364, 2004.

Ramsay, J. and Huber, M, Strain Analysis, The Techniques of Modern Structural Geology, vol. 1., Academic Press, London, 1983.

Wang, J. and Gutierrez, M., “Discrete element simulations of direct shear specimen scale effects.” Géotechnique, 60(5): 395-409, 2010.

Wang, Y., Yin, X., Ke, F. j., Xia, M. f. and Peng, K. Y. “Numerical simulation of rock failure and earthquake process on mesoscopic scale.” , pure and applied geophysics, 157(11-12): 1905-1928, 2000.

- West, T. R., Geology applied to engineering., Waveland Press, 2010.
- Yang, Y. R., Hu, J. C. and Lin, M. L., “Evolution of coseismic fault-related folds induced by the Chi-Chi earthquake: A case study of the Wufeng site, Central Taiwan by using 2D distinct element modeling.” , Journal of Asian Earth Sciences, **79**: 130-143, 2014.
- Yimsirić, S. and Sogać, K., “Micromechanics-based stress-strain behaviour of soils at small strains” , Géotechnique, **50**, No.5, 559-571, 2000.
- Yu, G., Xu, X., Klinger, Y., Diao, G., Chen, G., Feng, X., Li, C., Zhu, A., Yuan, R. and Guo, T., “Fault-scarp features and cascading-rupture model for the Mw 7.9 Wenchuan earthquake, eastern Tibetan plateau, China.” , Bulletin of the Seismological Society of America, 100(5B): 2590-2614, 2010.
- 江秀旭,「互層軟岩隧道破壞模式探討」,朝陽科技大學營建工程學系,碩士論文,共 155 頁,2003。
- 林郁鈞,「以離散元素法進行具鍵結顆粒材料之直剪試驗模擬」,國立中央大學土木工程學系,碩士論文,143 頁,2014。
- 黃文正、陳致言、劉思妤、林燕慧、林啟文、張徽正,「台灣中部大甲溪至頭汴坑溪九二一集集地震地表變形模式」, 經濟部中央地質調查所特刊, 12:63-87, 2010。
- 張光宗、陳宥序、鄭敏杰,「以數值方法探討卵礫石層的力學行為」, 中華水土保持學報, 45(2): 95-102, 2014。

張光宗、鄭敏杰、陳樹群，「由野外調查評估卵礫石層強度性質」。中華水土

保持學報，43(1):55-64，2012。

張吉佐、陳逸駿、嚴世傑、蔡宜璋，「台灣地區中北部卵礫石層工程性質及施工探討」，地工技術，(55): 35-46，1996。

張有毅，「以離心模型試驗及個別元素法評估正斷層和逆斷層錯動地表及地下變形」，國立中央大學土木工程學系，博士論文，共 249 頁，2013。

粘為東，「以 PFC2D 模擬砂土直剪實驗中之剪動帶及應用之研究」，國立臺灣大學土木工程學系碩士論文」，共 140 頁，2010。

潘國樑，工程地質學導論，初版，科技圖書出版社，台灣，2007。

鍾春富，「逆斷層錯動引致上覆土層變形行為及對結構物影響之研究」，國立臺灣大學土木工程學系，博士論文，共 271 頁，2007。

附錄

a. 竹山槽溝構造模擬試驗程式碼

PFC^{2D} 將程式碼輸入文字文件檔中，以 PFC^{2D} 程式執行，為了將各流程分開，本研究根據不同的試驗設定設定不同的文字文件檔。而 RunModel 的文字文件檔中包含所有重要的參數，並且只要執行此文字文件檔，即會進行所有的流程。

RunModel.txt

```
new
;-----
;          設置參數
;-----
def all_parameter
;-----
;          調整模型尺寸、層厚、顆粒數量
;-----
rcase      = 2           ;第幾組粒徑
S_thick    = 0.0875     ;土層總厚度
G_thick    = 0.05        ;礫石層厚度(決定有無礫石層)
T_thick    = S_thick + G_thick ;總厚
box_width  = 1.0         ;模型尺寸
box_height = T_thick*1.5  ;要比總層厚高
layer_in   = 0.0125      ;土層間距(m)
ball_num   = 20000        ;顆粒數量(土層)
G_Ball_num = 12000        ;顆粒數量(礫石層)
;-----
;          調整土粒半徑
;-----
S_r11     = 7.4e-4       ;土層最小粒徑(單位為 m)
S_r2      = 1.5           ;上覆土層顆粒半徑比
S_r3      = 2.0           ;上覆土層顆粒半徑比(最大)
G_r11     = S_r11*2       ;礫石層顆粒半徑
G_r2      = 1.5           ;粒徑與最小半徑比(兩組半徑時=0)
G_r3      = 2.0
;-----
;          調整土壤密度、數量、Kn/Ks 比值
;-----
;-----礫石層-----
```

```

GBallDensity = 2320 ;顆粒 densith,kn,ks
Gi_kn = 6e8
Gkn1 = Gi_kn
Gk_ratio = 2.5 ;kn / ks 比值
Gks1 = Gi_kn/Gk_ratio
Gfriangle = 36.0 ;顆粒間磨擦角
Gfric = tan(Gfriangle*pi/180)
G11RatioN = 0.10 ;顆粒數量比(最小)
G22RatioN = 0.15 ;(次大)
G33RatioN = 0.75 ;(最大)
GMass = 0 ;關閉密度調整
;GMass = (0.7*G_thick*box_width)*2600
;-----土壤層-----
SBallDensity = 2600 ;顆粒 densith,kn,ks
Si_kn = 2.2e7
Skn1 = Si_kn ;kn/ks=2.6
Sk_ratio = 2.3 ;knks 比值
Sks1 = Si_kn/Sk_ratio
Sfriangle = 36.0 ;顆粒間磨擦角
Sfric = tan(Sfriangle*pi/180)
S11RationN = 0.15 ;顆粒數量比(最小)
S22RationN = 0.10 ;(次大)
S33RationN = 0.75 ;(最大)
;SMass = 0
SMass = (0.8*box_width*S_thick)*2700
;-----;
; 固定參數
;-----;
bid = 0 ;初始球 ID 必須要等於零
S_r33 = S_r11*S_r3
S_r22 = S_r11*S_r2
G_r22 = G_r11*G_r2
G_r33 = G_r11*G_r3
large_h = box_height*3 ;加長盒子的高度 S_i = S_thick/layer_in +
1 ;土層總層數
end

def data_name

```

```
    jpg_name = 'case'+string(rcase) + '_' + string(setSoilbond) + 'kPa' + '_' + string(m) + '.jpg'  
end
```

;box_parameter

```
call 01makeball.txt  
call 02layer_makerh.txt  
call chushan.txt
```

01makeball.txt

```
set gen_error off  
set random  
set disk on  
set gravity 0 -784  
set dt dscale
```

建立礫石層(三組粒徑)

def make_Gball_3R

```
xst=0  
xsec=box_width  
yst=0  
ysec=large_h
```

```
if b_G_end =0  
    b_G_end=1  
end_if
```

Gball1_beg = b_G_end + 1
Gball1_end = Gball1_beg + (G_Ball_num*G11RatioN)

```

Gball2_beg = Gball1_end + 1
Gball2_end = Gball1_end + (G_Ball_num*G22RatioN)
Gball3_beg = Gball2_end + 1
Gball3_end = Gball2_end + (G_Ball_num*G33RatioN)

b_G_end    = Gball3_end
b_G_test   = Gball3_end
command
  generate id=Gball1_beg,Gball1_end      rad=G_r11,G_r11 x=xst,xsec y=yst,ysec
  generate id=Gball2_beg,Gball2_end rad=G_r22,G_r22 x=xst,xsec y=yst,ysec
  generate id=Gball3_beg,Gball3_end rad=G_r33,G_r33 x=xst,xsec y=yst,ysec
  property density=GBallDensity kn=1e7 ks=3.84e6 fric=0 range id=bid, Gball3_end
  cyc 100
  balanceforce
  G_run_delete
end_command
end
;pause
;-----;
;          建立礫石層(兩組粒徑)
;-----;
def make_Gball_2R

xst=0
xsec=box_width
yst=0
ysec=large_h

if b_G_end =0
  b_G_end=1
end_if

Gball1_beg = b_G_end + 1
Gball1_end =  Gball1_beg + (G_Ball_num*G11RatioN)
Gball3_beg = Gball1_end + 1
Gball3_end = Gball1_end + (G_Ball_num*G33RatioN)

b_G_end    = Gball3_end + 1

```

```

b_G_test  = Gball3_end

command
  generate id=Gball1_beg,Gball1_end      rad=G_r11,G_r11 x=xst,xsec y=yst,ysec
  generate id=Gball3_beg,Gball3_end rad=G_r33,G_r33 x=xst,xsec y=yst,ysec
  property density=GBallDensity kn=1e7 ks=3.84e6 fric=0 range id=bid, Gball3_end
  cyc 100
  balanceforce
  G_run_delete
end_command
end

;-----;
;          圈定元素範圍(Y 軸)
;-----;

def up_layer
  range_element
    _y=fc_arg(2)
  if _y<layer_thick then
    up_layer =0
  end_if
end
;-----;
;          建立粘土層(三組粒徑)
;-----;

def make_Sball_3R

  b_S_beg = b_G_end + 1

  loop j(1,S_i)
    i=j+1

    sand_name  = 'sand'+string(i)

    xst = 0
    xsec = box_width
    yst  = G_thick + layer_in*(j)
    ysec = large_h

```

```

ytop = G_thick + layer_in*(j)
ball_n = ball_num/(S_i)

b_LayerBeg = b_S_beg

Sball1_beg = b_LayerBeg + ball_n*(j-1)
Sball1_end = Sball1_beg + (ball_n *(S11RationN))
Sball2_beg = Sball1_end +1
Sball2_end = Sball2_beg + (ball_n *(S22RationN))
Sball3_beg = Sball2_end +1
Sball3_end = Sball1_end + (ball_n *(S33RationN))

b_LayerBeg = Sball3_end + 1
    command
generate id=Sball1_beg,Sball1_end rad=S_r11,S_r11 x=xst,xsec y=yst,ysec
generate id=Sball2_beg,Sball2_end rad=S_r22,S_r22 x=xst,xsec y=yst,ysec
generate id=Sball3_beg,Sball3_end rad=S_r33,S_r33 x=xst,xsec y=yst,ysec
property density=SBallDensity kn=Si_kn ks=Sks1 fric=0 range id=Sball1_beg,Sball3_end
    solve
    balanceforce
    S_run_delete
    end_command
end_loop
end
;pause
;-----;
;          建立粘土層(兩組粒徑)
;-----;

def make_Sball_2R

b_S_beg = b_G_end + 1

loop j(1,S_i)
    i=j+1

    sand_name = 'sand'+string(i)

```

```

xst = 0
xsec = box_width
yst  = G_thick + layer_in*(j)
ysec = large_h

ytop = G_thick + layer_in*(j)
ball_n = ball_num/(S_i)

b_LayerBeg = b_S_beg

Sball1_beg = b_LayerBeg + ball_n*(j-1)
Sball1_end = Sball1_beg + (ball_n *(S11RationN))
Sball3_beg = Sball1_end +1
Sball3_end = Sball3_beg + (ball_n *(S33RationN))

b_LayerBeg      = Sball3_end + 1
      command
      generate id=Sball1_beg,Sball1_end rad=S_r11,S_r11 x=xst,xsec y=yst,ysec
      generate id=Sball3_beg,Sball3_end rad=S_r33,S_r33 x=xst,xsec y=yst,ysec
      property density=SBallDensity kn=Si_kn ks=SkS1 fric=0 range
      id=Sball1_beg,Sball3_end
      :group sand_name range x 0 box_width y yst ysec
      solve
      balanceforce
      S_run_delete
      end_command
      end_loop
end
;-----
;          平衡 FISH
;-----
def balanceforce
  i=0
  loop i(1,200)
    bf=av_unbal
    if bf > 1.0e-003
      command
      cyc 10000

```

```

        end_command
    end_if
end_loop
end
;-----
;           FISH_Gravel_RUN_DELETE
;-----
def G_run_delete
    command
        solve
        del ball range x 0 box_width y G_thick large_h
        cyc 5000
    end_command
    unbalance_force = av_unbal
    loop while unbalance_force > 1e-3
        command
            del ball range x 0 box_width y G_thick large_h
            cyc 5000
        end_command
        unbalance_force = av_unbal
    end_loop
end
;-----
;           FISH_Soil_RUN_DELETE
;-----
def S_run_delete
    command
        solve
        del ball range x 0 box_width y ytop large_h
        cyc 5000
    end_command
    unbalance_force = av_unbal
    loop while unbalance_force > 1e-3
        command
            del ball range x 0 box_width y ytop large_h
            cyc 5000
        end_command
        unbalance_force = av_unbal

```

```

    end_loop
end
;-----;
;           隨深度調 kn FISH
;-----;
def SKnsChange

    S_kn2  = Si_kn*(2^0.4)
    S_kn3  = Si_kn*(3^0.4)
    S_kn4  = Si_kn*(4^0.4)
    S_kn5  = Si_kn*(5^0.4)
    S_kn6  = Si_kn*(6^0.4)
    S_kn7  = Si_kn*(7^0.4)
    S_kn8  = Si_kn*(8^0.4)
    S_kn9  = Si_kn*(9^0.4)

    S_ks2  = Sks1*(2^0.4)
    S_ks3  = Sks1*(3^0.4)
    S_ks4  = Sks1*(4^0.4)
    S_ks5  = Sks1*(5^0.4)
    S_ks6  = Sks1*(6^0.4)
    S_ks7  = Sks1*(7^0.4)
    S_ks8  = Sks1*(8^0.4)
    S_ks9  = Sks1*(9^0.4)

end

def GKnsChnage

    G_kn2  = Gi_kn*(2^0.4)
    G_kn3  = Gi_kn*(3^0.4)
    G_kn4  = Gi_kn*(4^0.4)
    G_kn5  = Gi_kn*(5^0.4)
    G_kn6  = Gi_kn*(6^0.4)
    G_kn7  = Gi_kn*(7^0.4)
    G_kn8  = Gi_kn*(8^0.4)
    G_kn9  = Gi_kn*(9^0.4)

    G_ks2  = Gks1*(2^0.4)

```

```

G_ks3  = Gks1*(3^0.4)
G_ks4  = Gks1*(4^0.4)
G_ks5  = Gks1*(5^0.4)
G_ks6  = Gks1*(6^0.4)
G_ks7  = Gks1*(7^0.4)
G_ks8  = Gks1*(8^0.4)
G_ks9  = Gks1*(9^0.4)

end
;-----;
;          尋找礫石層面積，監測載重
;-----;

def get_GVolum

GTotalBall = 0
Gsum        = 0.0
bp          = ball_head

if Gmass > 0
loop while bp # null
  GTotalBall = GTotalBall + 1
  Gsum = Gsum + pi * b_rad(bp)^2
  bp = b_next(bp)
end_loop

pmeas  = 1.0 - Gsum /(box_width*G_thick)
GTrueD = GMass/Gsum
end_if

if GMass = 0
loop while bp # null
  GTotalBall = GTotalBall + 1
  Gsum = Gsum + pi * b_rad(bp)^2
  bp = b_next(bp)
end_loop

GTrueD = GBallDensity
end_if

```

```

end

;-----;
;          尋找黏土層面積，監測載重
;-----;

def get_SVolum

Tsum = 0.0
bp = ball_head

if SMass > 0
    loop while bp # null
        Tsum = Tsum + pi * b_rad(bp)^2
        bp = b_next(bp)
    end_loop
    pmeas = 1.0 - Tsum / (box_width*G_thick)
    STrueD = SMass/(Tsum-Gsum)
end_if

if SMass = 0
    STrueD = SBallDensity
end_if
end

def Dforce
wp1=find_wall(1)
Dforce=w_yfob(wp1)/box_width
end

;-----;
;          生成所有礫石層 FISH
;-----;

def grain_layer

if G_thick = 0
    b_G_end = 1
    if S_r3 > 0
        end_if
    if S_r3 = 0

```

```

        end_if
    end_if

    if G_thick > 0
        if S_r3 = 0
            make_Gball_2R
        end_if
        if S_r3 > 0
            make_Gball_3R
        end_if
    end_if
end

;-----
;  生層土層 FISH，輸入新 density(No Group，因為 Grid point 的緣故)
;-----

def soil_layer
    if S_r3 > 0
        make_Sball_3R
    end_if
    if S_r3 = 0
        make_Sball_2R
    end_if
end

;-----
;===== 建立砂箱模型 =====
;-----



all_parameter

wall id=1 nodes(0,0)(box_width,0) kn=6e9 ks=6e9 fric=0.364
wall id=2 nodes(0,large_h)(0,0) kn=6e9 ks=6e9 fric=0.364
wall id=3 nodes(box_width,0)(box_width,large_h) kn=6e9 ks=6e9 fric=0.364

plot add wall id on

```

```

pl add ball blue red cyan yellow LOrange LRed Brown
plot show

;-----;
;          生成礫石層
;-----;

grain_layer
SKnsChange
GKnsChnage

;-----;
;          調整礫石層 density
;-----;

get_GVolum
print Gsum
  property density=GTrueD kn=Si_kn ks=Sks1 fric=Sfric range id=bid,Gball3_end
  cyc 100
  balanceforce
print Dforce
print GTrueD
;-----;
;          隨深度調整礫石層 kn 值
;-----;

prop kn  G_kn2 ks G_ks2 range x (0,box_width) y(0.07,0.08)
prop kn  G_kn3 ks G_ks3 range x (0,box_width) y(0.06,0.07)
prop kn  G_kn4 ks G_ks4 range x (0,box_width) y(0.05,0.06)
prop kn  G_kn5 ks G_ks5 range x (0,box_width) y(0.04,0.05)
prop kn  G_kn6 ks G_ks6 range x (0,box_width) y(0.03,0.04)
prop kn  G_kn7 ks G_ks7 range x (0,box_width) y(0.02,0.03)
prop kn  G_kn8 ks G_ks8 range x (0,box_width) y(0.01,0.02)
prop kn  G_kn9 ks G_ks9 range x (0,box_width) y(0.00,0.01)

cyc 1000
G_run_delete
balanceforce
save gravel.sav
;-----;
;          生成土層

```

```

;-----
soil_layer
;-----
;          調整粘土層層 density
;-----
get_SVolum
  property density=STrueD kn=Si_kn ks=Sks1 fric=Sfric range id=b_G_end,Sball3_end
    cyc 100
    balanceforce
    print Tsum
    print STrueD
;-----
;          隨深度調整粘土層 kn 值
;-----
  prop kn  S_kn2 ks S_ks2 range x (0,box_width) y(0.16,0.17)
  prop kn  S_kn3 ks S_ks3 range x (0,box_width) y(0.15,0.16)
  prop kn  S_kn4 ks S_ks4 range x (0,box_width) y(0.14,0.15)
  prop kn  S_kn5 ks S_ks5 range x (0,box_width) y(0.13,0.14)
  prop kn  S_kn6 ks S_ks6 range x (0,box_width) y(0.12,0.13)
  prop kn  S_kn7 ks S_ks7 range x (0,box_width) y(0.11,0.12)
  prop kn  S_kn8 ks S_ks8 range x (0,box_width) y(0.10,0.11)

```

S_run_delete

save makeball.sav

chushan

new
restore chushan_model.sav

def parameter

```

;-----
;-----槽溝參數-----
;-----
```

thita	= 20	;斷層角度
fault_hight	= 0.036	;錯動高度

```

_dtltat      = 1e-4           ;時間垮距

Fault_vel    = 3.33e-5
y_v          = Fault_vel*sin(thita*pi/180);垂直速度=5cm/1732 sec
x_v          = -y_v/tan(thita*pi/180)    ;斷層 x-/y-速度
fault_cyc_num = 10                ;將結果分成幾段紀錄

_xtip        = 0.5              ;%指從左邊數來，總長度的幾%
y_slope      = -fault_hight    ;斷層高度(y 需負號)
faulttip     = wall_width*_xtip
x_slope      = faulttip-y_slope/tan(thita*pi/180)

;-----
;-----鍵結參數-----
;-----
siolbond     = 150              ;土層鍵結
intersoil    = siolbond        ;土層間鍵結(非必要)
grainbond    = 0                ;礫石層鍵結
;-----
;-----網格參數 -----
;-----
xspace_num   = 50
yspace_num   = 16
stage_num    = 10
radius1       = 40              ;最大粒徑
radius4       = 10              ;最小粒徑
stress        = 100             ;圍壓
;-----
;-----hist 參數-----
;-----
height_record = T_thick        ;觀察幾米高以下的顆粒(thick_max=總厚)
height_record_num = 0.45        ;分成幾個間隔紀錄長度

width_record  = box_width       ;觀察幾米寬
width_record_num = 60           ;分成幾個間隔紀錄寬度

wall_height   = box_height      ;牆邊界、速度(牆勁度已設)

```

```

wall_width      = box_width

fault_hightcyc = (fault_hight/(_dtltat*y_v))/fault_cyc_num
histcyc        = histmeter/_dtltat*y_v

end

parameter
;-----
;-----輸出名稱-----
;-----
def name_data
end
;-----
;-----Grid 輸出檔案-----
;-----
def hist_write
hist_begin = 1
hist_end   = xline_num * yline_num
loop h (hist_begin, hist_end)
;-----
xh = 2 * h + 2999
yh = 2 * h + 3000
command
hist write xh yh file grid_hist.txt
end_command
end_loop
end
;-----
;=====執行程式=====
;-----
call 01.model.txt
call 05grid_point.txt
call 02.hist.txt
call 03.run.txt
hist_write

```

```
call 04.plot_jpg.txt
output
```

01. Model.txt

```
set gen_error off
set random
set disk on
set gravity 0 -784
set dt dscale
=====
del wall 1
del wall 2
del wall 3
del wall 4
=====
parameter
===== (set the box) =====
wall id=1 nodes(0,wall_height(0,0) kn=6e9 ks=6e9 fric=0
wall id=2 nodes(0,0)(faulttip,0) kn=6e9 ks=6e9 fric=0
wall id=3 nodes(faulttip,0)(wall_width,0) kn=6e9 ks=6e9 fric=0
wall id=4 nodes(wall_width,0)(wall_width,wall_height) kn=6e9 ks=6e9 fric=0
wall id=5 nodes(x_slope,y_slope)(faulttip,0) kn=6e9 ks=6e9 fric=0

===== (set soil-soil bond) =====
def set_interbond
  num=S_i-1

  loop m(0,num)
    _Low = G_thick + layer_in*m + (layer_in*0.05)
    _hi  = G_thick + _Low + (layer_in*0.05)
    command
      prop n_bond intersoil s_bond intersoil range x (0,box_width) y(_Low,_hi)
    end_command
  end_loop
end

: set_interbond
-----
```

```

;                               碳石層鑑結 FISH
;-----
def set_bond

if grainbond > 0
    command
    prop n_bond grainbond s_bond grainbond range id 1,G_Ball_num
    end_command

end_if

```

```
end
```

```

;===== (all_soil
bond)=====
def all_soilbond
beg = Gball3_end + 1
    command
    prop n_bond siolbond s_bond siolbond range id=beg,Sball3_end
    end_command
end
;-----
;===== 設置模型 =====
;-----

```

```

plot add wall id on
pl add ball blue red cyan yellow LOrange LRed Brown
plot show

```

```

set_bond
all_soilbond
cyc 100
balanceforce

```

05grid_point.txt

```

;-----
;設置 grid point

```

```

;-----

def grid_dia
  xline_num = xspace_num + 1
  yline_num = yspace_num + 1
  xgrid_space = box_width / xspace_num
  ygrid_space = (T_thick) / yspace_num ;-1 是因為道 chushan 時會剪去一層(有時候會)
  _xx = 0
  _yy = 0
end

def grid_pos
  k = 0
  loop g (1, yline_num)
    loop gg (1, xline_num)
      bp_a = ball_near2(_xx, _yy)
      bp_i = b_id(bp_a)
      ;b_color(bp_a) = 3
      k = k + 1
      xk = 3000 + (2 * k - 1)
      yk = 3000 + (2 * k)
      command
        hist id xk nstep fault_hightcyc ball xpos id bp_i
        hist id yk nstep fault_hightcyc ball ypos id bp_i
      end_command
      _xx = _xx + xgrid_space
    end_loop
    _xx = 0
    _yy = _yy + ygrid_space
  end_loop
  _xx = 0
  _yy = 0
end

def grid_square
  _Gridx1 = 0
  _Gridy1 = 0
  la = 10001

```

```

loop gl (1, yspace_num)
  loop gs (1, xspace_num)

    lala = int(la)

    _Gridx2 = _Gridx1 + xgrid_space
    _Gridy2 = _Gridy1 + ygrid_space

    command
      group lala range x  _Gridx1 _Gridx2 y _Gridy1 _Gridy2
    end_command

    la = la + 1
    _Gridx1 = _Gridx1 + xgrid_space
  end_loop
  _Gridx1 = 0
  _Gridy1 = _Gridy1 + ygrid_space
end_loop
end

;-----;
;          執行指令
;-----;

grid_dia
grid_pos
grid_square
save grid.sav

call 02.hist.txt
;-----;
;          紀錄粘土層 y-position
;-----;

def b_position          ;此 hist 必須最先

h_in      = 0.01

x_histBeg = faulttip-box_width*0.30
x_in      = (box_width*0.5)/width_record_num

```

```

W_rn      = width_record_num -1

loop m(0,9)
  loop n(0,W_rn)

    x= x_histBeg + n*x_in
    y= m*h_in + G_thick

    ball_address=ball_near2(x,y)
    bid=b_id(ball_address)

;command
;prop color 1 range id bid
;end_command

command
  hist nstep=fault_hightcyc ball yp id=bid
  hist nstep=fault_hightcyc ball xp id=bid
end_command
  end_loop
end_loop
end

;-----
;-----
;          監測孔隙率
;-----


def measurement

  bp=ball_head
  totalball=0
  loop while bp # null
    totalball =totalball+1
    bp = b_next(bp)
  end_loop

  bp=ball_head
  loop while bp # null
    Total_brad=0

```

```

Total_brad=Total_brad+(b_rad(bp)^2*3.14)
bp = b_next(bp)
end_loop

Total_porosity=box_width*box_height-Total_brad

end

def output
    command
        hist wr 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32 34 36 38 40 42 44 46 48 50 52 54 56
58 60 file output_grain_yp_Layer1_1x.txt
        hist wr 1 3 5 7 9 11 13 15 17 19 21 23 25 27 29 31 33 35 37 39 41 43 45 47 49 51 53 55
57 59 file output_grain_yp_Layer1_1y.txt
        hist wr 62 64 66 68 70 72 74 76 78 80 82 84 86 88 90 92 94 96 98 100 102 104 106 108
120 file output_grain_yp_Layer1_2x.txt
        hist wr 61 63 65 67 69 71 73 75 77 79 81 83 85 87 89 91 93 95 97 99 101 103 105 107
109 111 113 115 117 119 file output_grain_yp_Layer1_2y.txt
        hist wr 122 124 126 128 130 132 134 136 138 140 142 144 146 148 150 152 154 156
158 160 162 164 166 168 170 172 174 176 178 180 file output_grain_yp_Layer2_1x.txt
        hist wr 121 123 125 127 129 131 133 135 137 139 141 143 145 147 149 151 153 155
157 159 161 163 165 167 169 171 173 175 177 179 file output_grain_yp_Layer2_1y.txt
        hist wr 182 184 186 188 190 192 194 196 198 200 202 204 206 208 210 212 214 216
218 220 222 224 226 228 230 232 234 236 238 240 file output_grain_yp_Layer2_2x.txt
        hist wr 181 183 185 187 189 191 193 195 197 199 201 203 205 207 209 211 213 215
217 219 221 223 225 227 229 231 233 235 237 239 file output_grain_yp_Layer2_2y.txt
        hist wr 242 244 246 248 250 252 254 256 258 260 262 264 266 268 270 272 274 276
278 280 282 284 286 288 290 292 294 296 298 300 file output_grain_yp_Layer3_1x.txt
        hist wr 241 243 245 247 249 251 253 255 257 259 261 263 265 267 269 271 273 275
277 279 281 283 285 287 289 291 293 295 297 299 file output_grain_yp_Layer3_1y.txt
        hist wr 302 304 306 308 310 312 314 316 318 320 322 324 326 328 330 332 334 336
338 340 342 344 346 348 350 352 354 356 358 360 file output_grain_yp_Layer3_2x.txt
        hist wr 301 303 305 307 309 311 313 315 317 319 321 323 325 327 329 331 333 335
337 339 341 343 345 347 349 351 353 355 357 359 file output_grain_yp_Layer3_2y.txt
        hist wr 362 364 366 368 370 372 374 376 378 380 382 384 386 388 390 392 394 396
398 400 402 404 406 408 410 412 414 416 418 420 file output_grain_yp_Layer4_1x.txt
        hist wr 361 363 365 367 369 371 373 375 377 379 381 383 385 387 389 391 393 395
397 399 401 403 405 407 409 411 413 415 417 419 file output_grain_yp_Layer4_1y.txt

```

hist wr 422 424 426 428 430 432 434 436 438 440 442 444 446 448 450 452 454 456
458 460 462 464 466 468 470 472 474 476 478 480 file output_grain_yp_Layer4_2x.txt
hist wr 421 423 425 427 429 431 433 435 437 439 441 443 445 447 449 451 453 455
457 459 461 463 465 467 469 471 473 475 477 479 file output_grain_yp_Layer4_2y.txt
hist wr 482 484 486 488 490 492 494 496 498 500 502 504 506 508 510 512 514 516
518 520 522 524 526 528 530 532 534 536 538 540 file output_grain_yp_Layer5_1x.txt
hist wr 481 483 485 487 489 491 493 495 497 499 501 503 505 507 509 511 513 515
517 519 521 523 525 527 529 531 533 535 537 539 file output_grain_yp_Layer5_1y.txt
hist wr 542 544 546 548 550 552 554 556 558 560 562 564 566 568 570 572 574 576
578 580 582 584 586 588 590 592 594 596 598 600 file output_grain_yp_Layer5_2x.txt
hist wr 541 543 545 547 549 551 553 555 557 559 561 563 565 567 569 571 573 575
577 579 581 583 585 587 589 591 593 595 597 599 file output_grain_yp_Layer5_2y.txt
hist wr 602 604 606 608 610 612 614 616 618 620 622 624 626 628 630 632 634 636
638 640 642 644 646 648 650 652 654 656 658 660 file output_grain_yp_Layer6_1x.txt
hist wr 601 603 605 607 609 611 613 615 617 619 621 623 625 627 629 631 633 635
637 639 641 643 645 647 649 651 653 655 657 659 file output_grain_yp_Layer6_1y.txt
hist wr 662 664 666 668 670 672 674 676 678 680 682 684 686 688 690 692 694 696
698 700 702 704 706 708 710 712 714 716 718 720 file output_grain_yp_Layer6_2x.txt
hist wr 661 663 665 667 669 671 673 675 677 679 681 683 685 687 689 691 693 695
697 699 701 703 705 707 709 711 713 715 717 719 file output_grain_yp_Layer6_2y.txt
hist wr 722 724 726 728 730 732 734 736 738 740 742 744 746 748 750 752 754 756
758 760 762 764 766 768 770 772 774 776 778 780 file output_grain_yp_Layer7_1x.txt
hist wr 721 723 725 727 729 731 733 735 737 739 741 743 745 747 749 751 753 755
757 759 761 763 765 767 769 771 773 775 777 779 file output_grain_yp_Layer7_1y.txt
hist wr 782 784 786 788 790 792 794 796 798 800 802 804 806 808 810 812 814 816
818 820 822 824 826 828 830 832 834 836 838 840 file output_grain_yp_Layer7_2x.txt
hist wr 781 783 785 787 789 791 793 795 797 799 801 803 805 807 809 811 813 815
817 819 821 823 825 827 829 831 833 835 837 839 file output_grain_yp_Layer7_2y.txt
hist wr 842 844 846 848 850 852 854 856 858 860 862 864 866 868 870 872 874 876
878 880 882 884 886 888 890 892 894 896 898 900 file output_grain_yp_Layer8_1x.txt
hist wr 841 843 845 847 849 851 853 855 857 859 861 863 865 867 869 871 873 875
877 879 881 883 885 887 889 891 893 895 897 899 file output_grain_yp_Layer8_1y.txt
hist wr 902 904 906 908 910 912 914 916 918 920 922 924 926 928 930 932 934 936
938 940 942 944 946 948 950 952 954 956 958 960 file output_grain_yp_Layer8_2x.txt
hist wr 901 903 905 907 909 911 913 915 917 919 921 923 925 927 929 931 933 935
937 939 941 943 945 947 949 951 953 955 957 959 file output_grain_yp_Layer8_2y.txt
hist wr 962 964 966 968 970 972 974 976 978 980 982 984 986 988 990 992 994 996
998 1000 1002 1004 1006 1008 1010 1012 1014 1016 1018 1020 file

```

output_grain_yp_Layer9_1x.txt
    hist wr 961 963 965 967 969 971 973 975 977 979 981 983 985 987 989 991 993 995
997 999 1001 1003 1005 1007 1009 1011 1013 1015 1017 1019 file
output_grain_yp_Layer9_1y.txt
    hist wr 1022 1024 1026 1028 1030 1032 1034 1036 1038 1040 1042 1044 1046 1048
1050 1052 1054 1056 1058 1060 1062 1064 1066 1068 1070 1072 1074 1076 1078 1080 file
output_grain_yp_Layer9_2x.txt
    hist wr 1021 1023 1025 1027 1029 1031 1033 1035 1037 1039 1041 1043 1045 1047
1049 1051 1053 1055 1057 1059 1061 1063 1065 1067 1069 1071 1073 1075 1077 1079 file
output_grain_yp_Layer9_2y.txt
    hist wr 1082 1084 1086 1088 1090 1092 1094 1096 1098 1100 1102 1104 1106 1108
1110 1112 1114 1116 1118 1120 1122 1124 1126 1128 1130 1132 1134 1136 1138 1140 file
output_grain_yp_Layer10_1x.txt
    hist wr 1081 1083 1085 1087 1089 1091 1093 1095 1097 1099 1101 1103 1105 1107
1109 1111 1113 1115 1117 1119 1121 1123 1125 1127 1129 1131 1133 1135 1137 1139 file
output_grain_yp_Layer10_1y.txt
    hist wr 1142 1144 1146 1148 1150 1152 1154 1156 1158 1160 1162 1164 1166 1168
1170 1172 1174 1176 1178 1180 1182 1184 1186 1188 1190 1192 1194 1196 1198 1200 file
output_grain_yp_Layer10_2x.txt
    hist wr 1141 1143 1145 1159 1149 1151 1153 1155 1157 1159 1161 1163 1165 1167
1169 1171 1193 1195 1177 1179 1181 1183 1185 1187 1189 1191 1193 1195 1197 1199 file
output_grain_yp_Layer10_2y.txt
    end_command
end
;-----;
;          設置監測圓
;-----;

```

```

def c_measurement
loop a(1,10)
    mx=faulttip+a*4
    my=3

    ball_add=ball_near2(mx,my)
    bidd=b_id(ball_add)
    bxp=b_x(ball_add)
    byp=b_y(ball_add)
    command

```

```
measure x bxp y byp rad 2
end_command
end_loop
```

n=0

```
loop n(1,3)
  m2x=faulttip
  m2y=3*n

  ball_add=ball_near2(m2x,m2y)
  biddd=b_id(ball_add)
  b2xp=b_x(ball_add)
  b2yp=b_y(ball_add)
  command
  measure x b2xp y b2yp rad 2
  end_command
end_loop
```

n=0

```
loop n(1,3)
  m2x=faulttip-5
  m2y=3*n

  ball_add=ball_near2(m2x,m2y)
  biddd=b_id(ball_add)
  b2xp=b_x(ball_add)
  b2yp=b_y(ball_add)
  command
  measure x b2xp y b2yp rad 2
  end_command
end_loop
```

end

;c_measurement

```
=====
;          開始記錄
=====
;
```

b_position

03.run.txt

```
-----
;          影片記錄 FISH
-----
def x_plot
  m=0
  loop i (1,fault_cyc_num)
    m=m+1
    command
      set dt _dlttat
      cycle fault_hightcyc
      save "m".sav
      movie snap file fault_progress005.avi
    end_command
  end_loop
end
-----
;          砂箱錯動
-----
;
```

balanceforce

```
wall id 3 yvel = y_v  xvel=x_v
wall id 4 yvel = y_v  xvel=x_v
wall id 5 yvel = y_v  xvel=x_v
```

call fishcall.fis

call crk.fis

crk_init ;呼叫斷鍵

```

;-----  

;          影片記錄  

;-----  

pl set win po 0 -0.25  

pl set win s 1.5 0.75  

pl set size 0 -0.25 1.5 0.75  

pl set ca s 10  

set plot avi size 1024 768  

movie avi_open file fault_progress005.avi  

x_plot  

movie avi_close file fault_progress005.avi  

sav ChushanFinal.sav  

call 04.plot_jpg.txt  

new  

restore 1.sav  

def jpg_name  

  jpg_name = 'case'+string(rcase) + '_' + string(setSoilbond) + 'kPa' + '_' + string(m) + '.jpg'  

end  

  set plot jpg  

set plot quality 2  

plot hard file jpg_name  

  plot clear  

new  

restore 5.sav  

def jpg_name  

  jpg_name = 'case'+string(rcase) + string(setSoilbond) + 'kPa' + ' ' + string(m) + '.jpg'  

end  

  set plot jpg  

set plot quality 2  

plot hard file jpg_name

```

```

plot clear

new

restore 10.sav
def jpg_name
    jpg_name = 'case'+string(rcase) + string(setSoilbond) + 'kPa' + '_' + string(m) + '.jpg'
end
    set plot jpg
set plot quality 2
plot hard file jpg_name
    plot clear

```

b. 直剪盒試驗程式碼

方法同上，將不同的文字檔分開放在附錄中

RunModel.txt

```

new
def all_parameter
    command
        macro prop_wall    'kn 2.4e10 ks 4.686e9 fric= 0'    ;外盒的勁度
        macro prop_ball_1 'density 2200 kn 1e7 ks 3.846e6 fric 0.0'
        macro prop_ball_2 'kn 1e7 ks 3.846e6'
        macro prop_ball_3 'fric 0.73'    ;直剪時顆粒的摩擦係數
        macro prop_ball_4 'kn 1e7 ks 3.846e6'    ;緊砂需要把調大一個 order
        macro shear_vel    'shear_velocity'
    end_command
;-----
height      = 12e-2
length      = 18e-2
;-----
stress      = 20          ;頂板的正向力(單位 kPa)
Brad        = 1.5e-3      ;頂板顆粒大小
shear_velocity = 1*1e-6    ;剪動速度
shear_distance = length*0.1 ;剪動總距離
ball_num    = 3000
pic_num     = 15

```

```

_dtdscale      = 0.0001
;-----
xspace_num = 30
yspace_num = 15
;-----
radius1 = 149    ;只有這邊的單位是 mm*1e-2(最大粒徑)
radius2 = 105    ;只有這邊的單位是 mm*
radius3 = 74     ;只有這邊的單位是 mm* (最小粒徑)
radius4 = 149    ;只有這邊的單位是 mm (記錄用)
;-----
CBond = 0

PBond = 0
Pr    = 0
Pkn   = 0
PkS   = 0
PnS   = 0
Pss   = 0
;-----
data_file      = 'data'          + string(radius4) + '~' + string(radius1) + '_' +
string(stress) + '.txt'
picture_jpg    = 'picture'       + string(radius4) + '~' + string(radius1) + '_' +
string(stress)
stress_strain_jpg = 'stress_strain' + string(radius4) + '~' + string(radius1) + '_' +
string(stress) + '.jpg'
stress_disp_jpg = 'stress_disp'   + string(radius4) + '~' + string(radius1) + '_' +
string(stress) + '.jpg'
porosity_jpg   = 'porosity'       + string(radius4) + '~' + string(radius1) + '_' +
string(stress) + '.jpg'
top_height_jpg = 'top_height'     + string(radius4) + '~' + string(radius1) + '_' +
string(stress) + '.jpg'
end
def plot_setting
    command
        plot clear
        plot show
        plot set cap size 20
        plot set back white

```

```

plot add wall black
plot add ball white green lorange red
end_command
end
all_parameter
;-----
call 01prepare.txt
call 02top.txt
call 03hist.txt
call 04grid_point.txt
call 05run.txt
;-----
;選擇是全部跑完再存檔還是跑 1/10 存檔一次
;-----
;restore set_done.sav

;prop n_bond CBond s_bond CBond range id (1,ball3_end)
;prop pb_radius Pr pb_kn Pkn pb_ks Pks pb_nstrength Pns pb_sstrength Pss range x
(0,length) y(0,height)

;run_way
new
restore set_done.sav
prop n_bond CBond s_bond CBond range id (1,ball3_end)
;prop pb_radius Pr pb_kn Pkn pb_ks Pks pb_nstrength Pns pb_sstrength Pss range x
(0,length) y(half_height2,half_height)

run_way_data
;-----
call 06hist_write.txt

```

01prepare.txt

```

set random
set disk on
set dt dscale
set gen_error of
set disk length

```

```

;set log on
;set logfile xxx.txt
def parameter_count
    half_length  = 0.5 * length
    half_height  = 0.5 * height
    half_height2 = 0-half_height
    wing          = 0 - shear_distance
    wing2         = length + shear_distance
    b_height      = 1.5 * height
    start_height = half_height*1.5      ;也就是 2.016
    _stress       = stress * 1e3
end
def make_wall
    command
        wall id 1 node wing    0          0          0          kn 2.4e14 ks
4.686e14
        wall id 2 node 0      0          0          half_height2  prop_wall
        wall id 3 node 0      half_height2 length half_height2  prop_wall
        wall id 4 node length half_height2 length 0          prop_wall
        wall id 5 node length 0          wing2  0          kn 2.4e14 ks 4.686e14
        wall id 6 node wing2  0          length 0          kn 2.4e14 ks 4.686e14
        wall id 7 node length 0          length b_height  prop_wall ;上盒右板
        wall id 8 node length b_height 0          b_height  prop_wall ;頂板
        wall id 9 node 0      b_height  0          0          prop_wall ;上盒左
板
        wall id 10 node 0     0          wing    0          kn 2.4e14 ks
4.686e14
    end_command
end
parameter_count
make_wall
;-----
;產生球在當中了
;-----
def gen_ball
    _radius1 = radius1 * 1e-5
    _radius2 = radius2 * 1e-5
    _radius3 = radius3 * 1e-5

```

```

ball1_beg = b_start + 1
ball1_end = ball1_beg + (ball_num *(0.75)) - 1
ball2_beg = ball1_end + 1
ball2_end = ball2_beg + (ball_num *(0.10))
ball3_beg = ball2_end + 1
ball3_end = ball2_end + (ball_num *(0.15))

command
  gen id ball1_beg ball1_end rad _radius1 _radius1 x 0 length y half_height2 b_height
  gen id ball2_beg ball2_end rad _radius2 _radius2 x 0 length y half_height2 b_height
  gen id ball3_beg ball3_end rad _radius3 _radius3 x 0 length y half_height2 b_height
  prop prop_ball_1
  set grav 0 -980
  cyc 100000
  run_delete
end_command
b_start    = ball3_end
end
def run_delete
  command
    del ball range x 0 length y half_height  b_height
    cyc 5000
  end_command
  unbalance_force = av_unbal
  loop while unbalance_force > 1e-3
    command
      del ball range x 0 length y half_height  b_height
      cyc 5000
    end_command
    unbalance_force = av_unbal
  end_loop
end
gen_ball
gen_ball
;-----
;給球上個顏色上 25 條
;-----

```

```

def group_layer

layer_number  = length/25
left_layer    = 0
m            = 0

loop n(1,25)

m            = m+1
left_layer   = layer_number*(n-1)
right_layer  = layer_number*n

if m =1
  command
    prop c_index 1 range x left_layer right_layer
  end_command
  m = 2
end_if

if m =3
  command
    prop c_index 0 range x left_layer right_layer
  end_command
  m = 0
end_if
end_loop

end

save prepare_1.sav
;-----
;加上上盒
;-----
def change_wall
  command
    del wall 7 8 9

```

```

wall id 7 node length 0           length  start_height  prop_wall  ;上盒右板
wall id 9 node 0      start_height  0      0      prop_wall  ;上盒左
板
end_command
end
change_wall
save prepare.sav

```

02top.txt

```

;-----
;建立球牆
;-----
new
set gen_error of
set disk on

restore prepare.sav

def balanceforce

loop i(1,200)
bf=av_unbal
if bf > 1.0e-003
command
cyc 10000
end_command
end_if
end_loop

end

```

def TopBall

```

TBnum    = length/(Brad*2)

TBBid    = ball3_end + 1
TBend    = TBBid + TBnum-1

```

```

stress_ = stress*1e3

BeamD = (stress_)/(TBnum*Brad*Brad*3.14159*980)

```

```

TopStart_hight = half_height + Brad*20

```

```

;確保顆粒不被 fixed 住

```

```

freex1 = -1
freex2 = length*1.1
freey1 = half_height2*1.1
freey2 = half_height*1.1

```

```

loop _ballBeam (TBBid,TBend)

```

```

Beam = length + Brad - Brad*2*(_ballBeam-TBBid+1)

```

```

command

```

```

  ball rad Brad x Beam y TopStart_hight id _ballBeam
  end_command
end_loop

```

```

command

```

```

  clump id=1 range x 0 length y TopStart_hight TopStart_hight
  prop density = BeamD kn 2.4e7 ks 4.686e7 fric=0.0 range id TBBid,TBend
  fix x range id TBBid,TBend
  fix spin range id TBBid,TBend

```

```

;free x range x freex1 freex2 y freey1 freey2
;free spin range x freex1 freex2 y freey1 freey2
end_command

```

```

end

```

```

def Topforce
  _TopN = 0
  TBend1 = TBend-1

```

```

loop cc(TBBid,TBend1)
  beam_poi  = find_ball(cc)
  _TopN      = _TopN + b_yfob(beam_poi)
end_loop
Topforce = _TopN/(length)
end

```

```

def Downforce
Down  = find_wall(3)
DownN = w_yfob(Down)
Downforce = DownN/(length)
end

```

-----改動深度-----

```
def SKnsChnage
```

```

S_kn2  = 1e7*(2^0.4)
S_kn3  = 1e7*(3^0.4)
S_kn4  = 1e7*(4^0.4)
S_kn5  = 1e7*(5^0.4)
S_kn6  = 1e7*(6^0.4)
S_kn7  = 1e7*(7^0.4)
S_kn8  = 1e7*(8^0.4)
S_kn9  = 1e7*(9^0.4)
S_kn10 = 1e7*(9^0.4)
S_kn11 = 1e7*(9^0.4)
S_kn12 = 1e7*(9^0.4)

```

```

S_ks2  = 3.84e6*(2^0.4)
S_ks3  = 3.84e6*(3^0.4)
S_ks4  = 3.84e6*(4^0.4)
S_ks5  = 3.84e6*(5^0.4)
S_ks6  = 3.84e6*(6^0.4)
S_ks7  = 3.84e6*(7^0.4)
S_ks8  = 3.84e6*(8^0.4)
S_ks9  = 3.84e6*(9^0.4)
S_ks10 = 3.84e6*(9^0.4)

```

```
S_ks11 = 3.84e6*(9^0.4)
```

```
S_ks12 = 3.84e6*(9^0.4)
```

```
command
```

```
prop kn  S_kn2 ks S_ks2 range x (0,length) y(0.04,0.05)
prop kn  S_kn3 ks S_ks3 range x (0,length) y(0.03,0.04)
prop kn  S_kn4 ks S_ks4 range x (0,length) y(0.02,0.03)
prop kn  S_kn5 ks S_ks5 range x (0,length) y(0.01,0.02)
prop kn  S_kn6 ks S_ks6 range x (0,length) y(0.00,0.01)
prop kn  S_kn7 ks S_ks7 range x (0,length) y(-0.01,0.0)
prop kn  S_kn8 ks S_ks8 range x (0,length) y(-0.02,-0.01)
prop kn  S_kn9 ks S_ks9 range x (0,length) y(-0.03,-0.02)
prop kn  S_kn10 ks S_ks10 range x (0,length) y(-0.04,-0.03)
prop kn  S_kn11 ks S_ks11 range x (0,length) y(-0.05,-0.04)
prop kn  S_kn12 ks S_ks12 range x (0,length) y(-0.06,-0.05)
```

```
end_command
```

```
end
```

```
;
```

```
=====執行載重=====
```

```
;
```

```
set grav 0 -980
```

```
pl add ball
```

```
pl add wall
```

```
pl sh
```

```
prop prop_ball_4
```

```
;
```

```
=====決定隨不隨深度調整 kn=====
```

```
;
```

```
SKnsChnage
```

```
run_delete
```

```
TopBall
```

```
downforce
```

```
;pause
```

```
cyc 30000
```

```
solve a 1e-3
```

```
Topforce
```

```
print Topforce
```

```
;pause
```

```
save top.sav
```

```
03hist.txt
```

```
;
```

```
;定義 hist step
```

```
;
```

```
def hist_step
```

```
    total_step = int(shear_distance / (shear_velocity * _dtdscale))
```

```
    small_step = int(total_step / pic_num)
```

```
end
```

```
hist_step
```

```
;
```

```
;找出各個牆的 pointer
```

```
;
```

```
def wall_addr
```

```
    wp1 = find_wall(1)
```

```
    wp2 = find_wall(2)
```

```
    wp3 = find_wall(3)
```

```
    wp4 = find_wall(4)
```

```
    wp5 = find_wall(5)
```

```
    wp6 = find_wall(6)
```

```
    wp7 = find_wall(7)
```

```
    wp9 = find_wall(9)
```

```
    wp10 = find_wall(10)
```

```
end
```

```
wall_addr
```

```
;
```

```
;找出球牆的 XY 方向力
```

```
;
```

```
def top_xf
```

```
    TOPS = 0
```

```

TBend1 = TBend-2
loop cc(TBBid,TBend1)
  beam_poi    = find_ball(cc)
  TOPS        = TOPS + b_xfob(beam_poi)
end_loop
top_xf=TOPS
end

```

top_xf

```

def top_yf
  TOPN = 0
  TBend1 = TBend-2
  loop cc(TBBid,TBend1)
    beam_poi    = find_ball(cc)
    TOPN        = TOPN + b_yfob(beam_poi)
  end_loop
  top_yf = TOPN
end

```

```

def top_height
  TBend1 = TBend-2
  height_poi = find_ball(TBend1)
  top_height = b_y(height_poi)
end
top_yf
top_height
;pause
;球牆 = 牆 id8
;-----
;定義正向力和剪力的比值
;-----
def ratio_1

```

```

  N = w_yfob(wp7) + top_yf + w_yfob(wp9)
  T = w_xfob(wp7) + top_xf + w_xfob(wp9)
  ratio_1 = T/N
end
def ratio_2

```

```

ratio_2 = top_yf/length
end
def ratio_3
  shear_force = w_xfob(wp7) + top_xf + w_xfob(wp9)
  ratio_3      = shear_force / length
end
def ratio_4
  normal_force = w_yfob(wp7) + top_yf + w_yfob(wp9)
  ratio_4      = normal_force / length
end
def ratio_5
  down_sforce = w_xfob(wp1) + w_xfob(wp2) + w_xfob(wp3) + w_xfob(wp4)
  ratio_5      = down_sforce / length
end
def ratio_6
  down_nforce = w_yfob(wp2) + w_yfob(wp3) + w_yfob(wp4)
  ratio_6      = down_sforce / length
end

def D_nf
  _D_nf      = w_yfob(wp3)
  D_nf       = _D_nf/length*length
end
D_nf
;-----
;定義下盒的位移距離
;-----
def displacement
  displacement = w_x(wp2) - 0
end
;-----
;監測頂板及側板
;-----
def begin_hist
  command
    hist id 1 nstep 1000000 wall xforce id 2
    hist id 2 nstep 1000000 top_yf
    hist id 3 nstep 1000000 wall xforce id 7

```

```

hist id 4 nstep 1000000 wall yforce id 7
hist id 5 nstep 1000000 D_nf
hist id 6 nstep 1000000 wall yforce id 7
hist id 7 nstep 1000000 wall xforce id 9
hist id 8 nstep 1000000 wall yforce id 9
hist id 9 nstep 1000000 wall yforce id 7
hist id 10 nstep 1000000 ratio_1
hist id 11 nstep 1000000 ratio_2
hist id 12 nstep 1000000 displacement
hist id 13 nstep 1000000 top_height
hist id 14 nstep 1000000 ratio_3
hist id 15 nstep 1000000 ratio_4
hist measure porosity id 1
hist measure porosity id 2
hist measure porosity id 3
hist measure porosity id 4
hist measure porosity id 5
hist measure porosity id 6
hist measure porosity id 7 ;高度 1.00
hist measure porosity id 8 ;高度 1.20
hist measure porosity id 9 ;高度 1.44
hist id 25 nstep 1000000 ratio_5
hist id 26 nstep 1000000 ratio_6
end_command
end
;-----
;監測 5000 顆球的 spin
;-----
def hist_spin
  sp_id = ball_head
  hist_spid = 10001
  loop sp (1, 5000)
    sp_ball = b_id(sp_id)
    command
      ;hist id hist_spid nstep small_step ball angle id sp_ball
    end_command
    sp_id = b_next(sp_id)
    hist_spid = hist_spid + 1

```

```

    end_loop
end
;-----
;設置監測圓
;-----
def measure_range
    measure_range1 = 0.03 * height
    measure_range2 = 0.05 * height
    measure_range3 = 0.10 * height
    measure_range4 = 0.15 * height
    measure_range5 = 0.20 * height
    measure_range6 = 0.25 * height
    measure_range7 = 0.30 * height
    measure_range8 = 0.40 * height
    measure_range9 = 0.50 * height
    command
        measure id 1 x half_length y 0 rad measure_range1
        measure id 2 x half_length y 0 rad measure_range2
        measure id 3 x half_length y 0 rad measure_range3
        measure id 4 x half_length y 0 rad measure_range4
        measure id 5 x half_length y 0 rad measure_range5
        measure id 6 x half_length y 0 rad measure_range6
        measure id 7 x half_length y 0 rad measure_range7
        measure id 8 x half_length y 0 rad measure_range8
        measure id 9 x half_length y 0 rad measure_range9
    end_command
end
measure_range
save hist.sav

```

04grid_point.txt

```

;-----
;設置 grid point(30 格 x15 格)
;-----
def grid_dia
    xline_num = xspace_num + 1
    yline_num = yspace_num + 1
    xgrid_space = length / xspace_num

```

```

ygrid_space = (half_height + start_height + bh) / yspace_num
_xx = 0
_yy = half_height2
end
grid_dia
def grid_pos
k = 0
loop g (1, yline_num)
loop gg (1, xline_num)
  bp_a = ball_near2(_xx, _yy)
  bp_i = b_id(bp_a)
  ;b_color(bp_a) = 3
  k = k + 1
  xk = 100 + (2 * k - 1)
  yk = 100 + (2 * k)
  command
    hist id xk nstep small_step ball xpos id bp_i
    hist id yk nstep small_step ball ypos id bp_i
  end_command
  _xx = _xx + xgrid_space
end_loop
_xx = 0
_yy = _yy + ygrid_space
end_loop
_xx = 0
_yy = half_height2
end
def grid_square
_xx1 = _xx
_yy1 = _yy
la = 10001
loop gl (1, yspace_num)
loop gs (1, xspace_num)
  lala = int(la)
  _xx2 = _xx1 + xgrid_space
  _yy2 = _yy1 + ygrid_space
  command
    group lala range x _xx1 _xx2 y _yy1 _yy2

```

```

end_command
la = la + 1
_xx1 = _xx1 + xgrid_space
end_loop
_xx1 = _xx
_yy1 = _yy1 + ygrid_space
end_loop
end
grid_square
save grid.sav

```

05run.txt

```

;-----
;設置跑的方法
;-----
def run_way
    save_name = picture_jpg + '_0.sav'
    jpg_name  = picture_jpg + '_0.jpg'
    command
        grid_pos
        ;hist_spin
        cyc small_step
        wall_velocity
        save save_name
        plot_setting
        set plot jpg
        set plot quality 2
        plot hard file jpg_name
        plot clear
    end_command
    loop save_n (1, pic_num)
        save_name = picture_jpg + '_' + string(save_n) + '.sav'
        jpg_name  = picture_jpg + '_' + string(save_n) + '.jpg'
        command
            cyc small_step
            save save_name
            plot_setting
            set plot jpg

```

```

        set plot quality 2
        plot hard file jpg_name
        plot clear
    end_command
end_loop
final_name = string(radius4) + '~' + string(radius1) + '_final.sav'
command
    save final.sav
    save final_name
end_command
end
def run_way_data
    final_data_name = string(radius4) + '~' + string(radius1) + '_final_data.sav'
    command
        begin_hist
        wall_velocity
        cyc total_step
        save final_data.sav
        save final_data_name
    end_command
end
;-----
;開始直剪
;-----
set dt _dtdscale
def wall_velocity
    command
        wall id 1 xv shear_velocity
        wall id 2 xv shear_velocity
        wall id 3 xv shear_velocity
        wall id 4 xv shear_velocity
    end_command
end

prop prop_ball_3
prop kn 2.4e7 ks 4.686e7 fric=0.0 range id TBBid,TBend
cyc 20000
balanceforce

```

```
save set_done.sav
```

06hist_write.txt

```
new
;restore final.sav
;-----;
;先寫下全部 grid 的座標
;-----;
def hist_write
    hist_begin = 1
    hist_end    = xline_num * yline_num
    loop h (hist_begin, hist_end)
        xh = 2 * h + 99
        yh = 2 * h + 100
        command
            hist write xh yh file grid_hist.txt
        end_command
    end_loop
end
;hist_write
;-----;
;先寫下全部顆粒旋轉
;-----;
def hist_write_spin
    bp        = ball_head
    hist_spid = 10001
    loop while bp # null
        command
            hist write hist_spid file spin_hist.txt
        end_command
        bp        = b_next(bp)
        hist_spid = hist_spid + 1
    end_loop
end
;hist_write_spin
;-----;
;所有顆粒的初始座標
;-----;
```

```

;restore 0.sav
;set logfile 全部球座標 0.txt
;set log on
;print ball position
;set log off
;-----
;所有顆粒的最後座標
;-----
;restore final.sav
;set logfile 全部球座標 final.txt
;set log on
;print ball position
;set log off
;-----
;寫下頂板速度、應力位移、頂板高度、整體孔隙率
;-----
restore final_data.sav
def hist_wrtie_data
    command
        hist write 2 3 9 10 11 12 13 14 15 20 25 26 file data_file
        ;-----剪應力/正應力曲線
        plot clear
        plot show
        plot set cap size 20
        plot set back white
        plot add hist 10 vs 12
        set plot jpg
        set plot quality 2
        plot hard file stress_strain_jpg
        ;-----下盒剪應力/正應力曲線
        plot clear
        plot show
        plot set cap size 20
        plot set back white
        plot add hist 26 vs 12
        set plot jpg
        set plot quality 2
        plot hard file _stress_strain_jpg

```

```

;-----孔隙率
plot clear
plot show
plot set cap size 20
plot set back white
plot add hist 16 17 18 19 20 21 22 23 vs 12
set plot jpg
set plot quality 2
plot hard file porosity.jpg
;-----頂板高度
plot clear
plot show
plot set cap size 20
plot set back white
plot add hist 13 vs 12
set plot jpg
set plot quality 2
plot hard file top_height.jpg
;-----應力位移曲線
plot clear
plot show
plot set cap size 20
plot set back white
plot add hist 14 15 vs 12
set plot jpg
set plot quality 2
plot hard file stress_disp.jpg
end_command
end
hist_wrtie_data

```

c. 雙軸試驗程式碼

此程式碼只有一份文字文件檔，故統一附上程式碼

```

new
;-----所有重要參數
;
def specimen_parameter  ;顆粒參數

```

```

;-----;
;                               顆粒半徑、數量比參數
;-----;

ball_num      = 2000

radius1       = 125
radius2       = 105
radius3       = 125

B1Raito      = 0.10
B2Ratio       = 0.15
B3Ratio       = 0.75

_radius1      = 7.4e-4           ;最小粒徑
_radius2      = _radius1*1.5
_radius3      = _radius1*2.0      ;最大粒徑

;-----;
;                               顆粒強度參數
;-----;

B_density     = 2420
BKn          = 2.2e7
BKnsratio    = 2.5
BKs          = BKn/BKnsratio
BFric        = 0.73

;-----;
;                               側板參數
;-----;

_lateralstr = 100
_BOND        = 50

bid          = 1

command
macro prop_ball_1 'density 1850 kn 4.08e6  ks 1.36e6 fric 0.0' ;照這顆粒墮降排

```

列

```
end_command
;-----
data_file  =  'data'          + string(radius3) + '~' + string(radius1) + '_' +
string(_lateralstr) + '.txt'
end

def BT_geometry  ;模型大小

specimen_height      = 0.15
specimen_width       = 0.075

wall_width           = specimen_width*1.5          ;調整擋板大小
wall_height          = specimen_height*2.3         ;下壓，速度
down_ratio           = 0.10           ;下壓與軸長成幾%的長度  down_velocity
= -1e-4
up_velocity          = -down_velocity           ;下壓速度
_dtdscale            = 1e-4
down_cyc             = (specimen_height*down_ratio)/(-down_velocity*_dtdscale)

_ballBeamRad         =  specimen_height/100
;BEAM 的半徑(根據要求顆粒數量，試體高度決定)(要能整除長度)
_ballBeamN            =  (1.0*specimen_height)/_ballBeamRad      ;調整 BEAM 數
量

specimen_XRlocation = wall_width*0.5+(specimen_width*0.5)
specimen_XLlocation = wall_width*0.5-(specimen_width*0.5)

lateral_L            = specimen_XLlocation
lateral_R            = specimen_XRlocation

end
;-----;
;          設置橡皮膜的 FISH
;-----;

def make_spring
```

```
_lateralforceL = (_lateralstr*1e3*specimen_height)/(_ballBeamN/2.0) ;側向應力
_lateralforceR = -(_lateralstr*1e3*specimen_height)/(_ballBeamN/2.0)
```

```
new_LFL = (_lateralstr*1e3*specimen_height)/((_ballBeamN/2.0)-2)
new_LFR = -(_lateralstr*1e3*specimen_height)/((_ballBeamN/2.0)-2)
```

```
BeamL = specimen_XLlocation - _ballBeamRad
BeamR = specimen_XRlocation + _ballBeamRad
```

```
_y = _ballBeamRad
```

```
BL_beg = ball3_end + 1 ;右球 spring id
BL_end = BL_beg + (_ballBeamN/2.0) - 1
BR_beg = BL_end + 1 ;右球 spring id
BR_end = BR_beg + (_ballBeamN/2.0) - 1
```

```
Left_end = _ballBeamN/2.0
Right_beg = Left_end+1
```

```
newRbeg = BR_beg + 1
newRend = BR_end - 1
```

```
newLbeg = BL_beg + 1
newLend = BL_end - 1
```

```
loop _ballBeamLeft (BL_beg,BL_end)
  command
    ball rad _ballBeamRad x BeamL y _y id _ballBeamLeft
  end_command
  _y=_y +2*_ballBeamRad
end_loop
```

```
_y=_ballBeamRad
```

```
loop _ballBeamRight (BR_beg,BR_end)
  command
    ball rad _ballBeamRad x BeamR y _y id _ballBeamRight
  end_command
```

```

        _y=_y +2*_ballBeamRad
    end_loop
end
;-----;
;          記錄球的位置
;-----;

def record_ini_position

;p1 上 p2 下 p3 左 p4 右
tracingP_Xp1=wall_width*0.5 ;調整至中心點
tracingP_Yp1=specimen_height*0.95
tracingP_Xp2=wall_width*0.5
tracingP_Yp2=specimen_height*0.05
tracingP_Xp3=wall_width*0.5-(specimen_width*0.4)
tracingP_Yp3=specimen_height*0.5
tracingP_Xp4=wall_width*0.5+(specimen_width*0.4)
tracingP_Yp4=specimen_height*0.5

bid1=ball_near2(tracingP_Xp1,tracingP_Yp1)
bid2=ball_near2(tracingP_Xp2,tracingP_Yp2)
bid3=ball_near2(tracingP_Xp3,tracingP_Yp3)
bid4=ball_near2(tracingP_Xp4,tracingP_Yp4)

P1=b_id(bid1)
P2=b_id(bid2)
P3=b_id(bid3)
P4=b_id(bid4)

P1x=b_x(bid1)
P1y=b_y(bid1)
P2x=b_x(bid2)
P2y=b_y(bid2)
P3x=b_x(bid3)
P3y=b_y(bid3)
P4x=b_x(bid4)
P4y=b_y(bid4)

```

```
;initial state
w0=sqrt((P3x-P4x)^2+(P3y-P4y)^2)
l0=sqrt((P1x-P2x)^2+(P1y-P2y)^2)
```

command

```
prop color 1 range id=p1
prop color 1 range id=p2
prop color 1 range id=p3
prop color 1 range id=p4
end_command
```

end

```
;-----
;           生球 FISH
;-----
```

def make_ball

```
ball1_beg = bid
ball1_end = ball1_beg + (ball_num *(B1Raito)) - 1
ball2_beg = ball1_end + 1
ball2_end = ball2_beg + (ball_num *(B2Ratio))
ball3_beg = ball2_end + 1
ball3_end = ball3_beg + (ball_num *(B3Ratio))

bid      = ball3_end + 1
```

command

```
gen id ball1_beg ball1_end rad _radius1 _radius1 x specimen_XLlocation
specimen_XRlocation y 0 wall_height
```

```
gen id ball2_beg ball2_end rad _radius2 _radius2 x specimen_XLlocation
specimen_XRlocation y 0 wall_height
```

```
gen id ball3_beg ball3_end rad _radius3 _radius3 x specimen_XLlocation
specimen_XRlocation y 0 wall_height
```

```
prop density B_density kn BKn ks BKs fric = 0.0
```

```
set dt max 1e-3
```

```
cyc 100000
```

```

    solve
    run_delete
end_command

end

def run_delete
    command
    del ball range x specimen_XLlocation specimen_XRlocation y specimen_height
    wall_height
    cyc 5000
end_command
unbalance_force = av_unbal
loop while unbalance_force > 1e-3
    command
    del ball range x specimen_XLlocation specimen_XRlocation y specimen_height
    wall_height
    cyc 5000
end_command
unbalance_force = av_unbal
end_loop

end
;-----;
;          調整顆粒強度參數 FISH
;-----;

def Speciment_strength
    command
    prop density B_density kn BKn ks BKs fric = BFric range id 1,ball3_end
    run_delete
end_command
end

;-----;
;          記錄 FISH
;-----;

```

```

def left_nstr
    blxf = 0
    loop a(BL_beg,BL_end)
        blpoi=find_ball(a)
        blxf=blxf+b_xfob(blpoi)
    end_loop
    left_nstr = -blxf/specimen_height
end

```

```

def right_nstr
    brxf = 0
    loop a(BR_beg,BR_end)
        bRpoi=find_ball(a)
        brxf=brxf+b_xfob(brpoi)
    end_loop
    right_nstr = blxf/specimen_height
end

```

```

def disp
    wp    = find_wall(1)
    disp = -w_y(wp)

```

```

end

def top_stress
    wp        = find_wall(1)
    Top_stress = w_yfob(wp)/specimen_width
end

```

```

def _cwidth
    P4x      = b_x(bid4)
    P3x      = b_x(bid3)
    _cwidth = (P4x - P3x)
end

```

```

def _clength
    P1y      = b_y(bid1)

```

```

P2y      = b_y(bid2)
_clength = (P1y- P2y)
end

def possion_r

w0 = tracingP_Xp4 - tracingP_Xp3
l0 = tracingP_Yp1 - tracingP_Yp2

possion_r = ((_cwidth - w0)/w0)/((l0 - _clength)/l0)
end

def E_r

w0 = tracingP_Xp4 - tracingP_Xp3
l0 = tracingP_Yp1 - tracingP_Yp2

E_r = (top_stress - left_nstr) / ((l0 - _clength)/l0)

end

def Record_hist

command
    hist id 1 nstep 100 left_nstr
    hist id 2 nstep 100 right_nstr
    hist id 3 nstep 100 _cwidth
    hist id 4 nstep 100 _clength
    hist id 5 nstep 100 disp
    hist id 6 nstep 100 Top_stress
    hist id 7 nstep 100 possion_r
    hist id 8 nstep 100 E_r
end_command

end

;-----

```

； 改動深度 kn 値 FISH

；-----

def SKnsChnage

```
S_kn2  = BKn*(2^0.4)
S_kn3  = BKn*(3^0.4)
S_kn4  = BKn*(4^0.4)
S_kn5  = BKn*(5^0.4)
S_kn6  = BKn*(6^0.4)
S_kn7  = BKn*(7^0.4)
S_kn8  = BKn*(8^0.4)
S_kn9  = BKn*(9^0.4)
S_kn10 = BKn*(9^0.4)
S_kn11 = BKn*(9^0.4)
S_kn12 = BKn*(9^0.4)
S_kn13 = BKn*(9^0.4)
S_kn14 = BKn*(9^0.4)
S_kn15 = BKn*(9^0.4)
```

```
S_ks2  = BKs*(2^0.4)
S_ks3  = BKs*(3^0.4)
S_ks4  = BKs*(4^0.4)
S_ks5  = BKs*(5^0.4)
S_ks6  = BKs*(6^0.4)
S_ks7  = BKs*(7^0.4)
S_ks8  = BKs*(8^0.4)
S_ks9  = BKs*(9^0.4)
S_ks10 = BKs*(9^0.4)
S_ks11 = BKs*(9^0.4)
S_ks12 = BKs*(9^0.4)
S_ks13 = BKs*(9^0.4)
S_ks14 = BKs*(9^0.4)
S_ks15 = BKs*(9^0.4)
```

command

```
prop kn  S_kn2 ks S_ks2 range x (specimen_XLlocation,specimen_XRlocation)
y(0.15,0.16)
```

```

prop kn  S_kn3 ks S_ks3 range x (specimen_XLlocation,specimen_XRlocation)
y(0.14,0.15)

prop kn  S_kn4 ks S_ks4 range x (specimen_XLlocation,specimen_XRlocation)
y(0.13,0.14)

prop kn  S_kn5 ks S_ks5 range x (specimen_XLlocation,specimen_XRlocation)
y(0.12,0.13)

prop kn  S_kn6 ks S_ks6 range x (specimen_XLlocation,specimen_XRlocation)
y(0.11,0.12)

prop kn  S_kn7 ks S_ks7 range x (specimen_XLlocation,specimen_XRlocation)
y(0.10,0.11)

prop kn  S_kn8 ks S_ks8 range x (specimen_XLlocation,specimen_XRlocation)
y(0.09,0.10)

prop kn  S_kn9 ks S_ks9 range x (specimen_XLlocation,specimen_XRlocation)
y(0.08,0.09)

prop kn  S_kn10 ks S_ks10 range x (specimen_XLlocation,specimen_XRlocation)
y(0.07,0.08)

prop kn  S_kn11 ks S_ks11 range x (specimen_XLlocation,specimen_XRlocation)
y(0.06,0.07)

prop kn  S_kn12 ks S_ks12 range x (specimen_XLlocation,specimen_XRlocation)
y(0.05,0.06)

prop kn  S_kn13 ks S_ks13 range x (specimen_XLlocation,specimen_XRlocation)
y(0.04,0.05)

prop kn  S_kn14 ks S_ks14 range x (specimen_XLlocation,specimen_XRlocation)
y(0.03,0.04)

prop kn  S_kn15 ks S_ks15 range x (specimen_XLlocation,specimen_XRlocation)
y(0.02,0.03)

end_command

```

```
end
```

```
;-----;
;                               雜 code
;-----;
def balanceforce
```

```
loop i(1,200)
```

```
bf=av_unbal
```



```

record_ini_position
;-----
;                                     生成像皮模
;-----

make_spring

    group springL range x BeamL BeamL y 0
specimen_height                                ;將左右球 group 起來
    group springR range x BeamR BeamR y 0 specimen_height

    prop density 2600 kn=5e9 ks=5e9 n_bond 1e8 s_bond 1e8 fric=0 range group
springL          ;產生接觸鍵結
    prop density 2600 kn=5e9 ks=5e9 n_bond 1e8 s_bond 1e8 fric=0 range group springR
;pause

wall id 1 nodes(wall_width,specimen_height)(0,specimen_height) kn=2.4e10 ks=4.686e9
fric=0.48 ;產生 top 檔板

del wall 3
del wall 4

prop xf_lateralforce1 range group
springL                                         ;給像皮膜側向應力
prop xf_lateralforce2 range group springR
fix y   range group springL
fix y   range group springR

cyc 10000

balanceforce
record_ini_position                            ;記錄球初始位置

save set_done.sav
;-----

```

```

=====
;                                     執行剪動
=====
;-----


new
restore set_done.sav

prop  n_bond _BOND s_bond _BOND range id 1,ball3_end ;設置鍵結
set dt = _dtdscale

Record_hist ;記錄資料

wall id=1 yvel= down_velocity
wall id=2 yvel= up_velocity
free y  range group springL ;使橡皮膜變形
free y  range group springR

prop  color 1 range group springL ;為橡皮膜上顏色
prop  color 1 range group springR

cyc down_cyc

wall id=1 yvel= 0

save final.sav
;-----


;                                     輸出與計算參數
;-----


hist write 1 2 3 4 5 6 7 8 file data_file

```