

國立臺灣大學工學院土木工程學系



碩士論文

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

礫石層組構特性對逆斷層引致複合地層變形之影響

The Influence of Gravel Fabric on Deformation of

Composite Strata Induced by Thrust Faulting

洪千惠

Chien-Hui Hung

指導教授：林銘郎 博士

Advisor: Ming-Lang Lin, Ph.D.

中華民國 109 年 6 月

June, 2020



國立臺灣大學碩士學位論文  
口試委員會審定書

礫石層組構特性對逆斷層引致複合地層變形之影響  
The Influence of Gravel Fabric on Deformation of  
Composite Strata Induced by Thrust Faulting

本論文係 洪千惠 君 (R07521106) 在國立臺灣大學土木工程學系  
完成之碩士學位論文，於民國 109 年 6 月 23 日承下列考試委員  
審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

林銘郎

(指導教授)

張光宗


楊國鑫

黃文昭

系 主 任

謝尚賢

## 致謝



此篇論文得以完成，首先要感謝指導教授 林銘郎老師的用心指導，老師對於工程地質的熱忱與專業以及對於研究的獨到眼光激勵我持續的學習與進步。感謝口試委員張光宗教授、黃文昭教授及楊國鑫教授對於本研究提出的問題與寶貴建議，讓此篇論文更加完整。感謝科技部計畫的專案補助（計畫編號：106-2221-E-002-085-MY2），使得研究順利完成。

碩士班兩年期間，再次感謝林銘郎老師的帶領，讓我從野外調查、課堂教學與學術研究都得到了珍貴的經驗。謝謝曾經在工程地質實驗室共事的健宏學長、承翰學長、沛宸學長、鈞元學長、劭儒學長、育瑄、忠勳和儒雅的協助與陪伴，大家各有所長，一起出野外、做研究和玩樂的日子裡，我從各位的身上學習成為一個更厲害、更溫柔的人。特別感謝博士班的健宏學長和承翰學長，提供研究上許多的建議與方向，因為我總是想得太多。謝謝大地組的同學在課業上的照應並分享玩樂的喜悅，也謝謝文心在碩士班剛開學時的照顧與生活上的關心。

兩年前來台大大地組的決定有些倉促，謝謝宋見春老師和賴啟銘老師的支持與推薦，讓我擁有碩士班的經歷且著實不虛此行。最後由衷感謝父母與家人在精神上 and 經濟上的無條件支持，讓我在台北順利完成碩士學位，而且每次回高雄都受到最高級的招待，謝謝你們。

## 摘要



根據近年世界著名災害性地震之調查結果，顯示鄰近斷層帶結構物受到地震破壞之原因，除了激發強烈暫態的地震波之外，還有斷層基盤錯動所引致之近地表岩土層變形。過去關於活動斷層引致上覆土層的變形行為與結構互制之研究中，多將覆土材料簡化為圓球狀顆粒的砂層或黏土層，礫石層多變的組構並未被充分考慮。臺灣 33 條活動斷層中，有 29 條活動斷層的近地表有礫石層分布，從斷層帶附近之露頭觀察與斷層槽溝開挖，可以證實斷層基盤上覆非均質的複合地層是普遍存在的，且堆積礫石層中含有不同排列方向、不同形狀、不同尺寸的礫石。

本研究探討含有礫石層之複合地層受逆斷層錯動引致的變形行為，利用小尺度物理砂箱試驗與離散元素法數值模擬軟體 (PFC<sup>3D</sup>) 分別進行基本行為觀察與定量分析，物理砂箱試驗的成果亦用來校核數值分析中的所需的微觀參數。複合地層變形結果顯示，礫石層中的斷層滑動面傾角較緩且發展距離較小，地表影響範圍與三角剪切帶範圍往上盤擴大。礫石層的組構特性由不同體積含量、不同排列方式與不同長徑比的橢球形礫石顆粒所控制，高礫石體積含量與較大的長徑比使礫石層的斷層滑動面發展距離較小；高礫石體積含量以及礫石的長軸方向與斷層滑動方向愈不一致的情況下會讓三角剪切帶的範圍明顯往上盤擴大，礫石排列方式亦影響礫石最後的長軸方向。此外，礫石的轉動特徵指示了三角剪切帶範圍，具有長徑比的礫石可做為觀察礫石層變形行為的指標，且隨著基盤抬升比愈高，礫石旋轉的範圍往下盤擴大，旋轉角度持續增加。

從竹山槽溝剝片取得竹山槽溝的礫石層組構之後，進一步利用數值分析工具模擬了竹山槽溝北牆的變形演育，斷層滑動面發展順序、地質構造演變過程、礫石層變形前緣的礫石轉動情形、生長地層與地層侵蝕作用可被合理重現。

關鍵字：逆斷層、礫石層、複合地層、砂箱試驗、離散元素法、竹山槽溝五次斷層活動逆推



## ABSTRACT

According to the investigations of well-known disastrous earthquakes in recent years, ground deformation induced by faulting is one of the causes for engineering structure damages in addition to strong ground motion. Previous studies which related to the deformation behavior of overburden soil induced by faulting and its impact on structures often simplify the overburden soil as spherical particles like sandy soil or clay, the complex fabric of gravel layer haven't been fully considered. However, among the 33 active faults in Taiwan, there are 29 active faults with gravel layer distributed near the ground surface. Moreover, based on the trench excavation results in the fault zone, nonhomogeneous composite strata with gravel deposits in different arrangement, shapes and sizes overlay on the basement fault are common.

A small-scale physical sandbox experiment and discrete element method numerical analysis(PFC<sup>3D</sup>) are conducted to figure out the basic behavior and do the quantitative analysis. Results from sandbox experiment are also used to calibrate microscopic parameters in numerical analysis. The deformation results of the composite strata show that the fault sliding surface in the gravel layer has a smaller dip angle and a slower development. The triangular shear zone in gravel layer is bigger that extends upward to the hanging wall. The fabric of the gravel layer are controlled by ellipsoidal gravel particles with different volume contents, arrangement and aspect ratios. Higher gravel volumetric content and the larger aspect ratio of gravels make the gravel layer more difficult to deform that developing a shorter fault sliding surface. The volumetric content and the arrangement of gravel mainly affect the range of the triangular shear zone, and the arrangement of gravel also affects the final deposition direction of the gravel. In addition, the rotation characteristics of the gravel indicate the range of the triangular shear zone, and the gravel with an aspect ratio can be used as an indicator the coseismic

deformation behavior of the gravel layer. As the uplift ratio increasing, the rotation region of gravel expands into the footwall, and the rotation angle continues to increase.

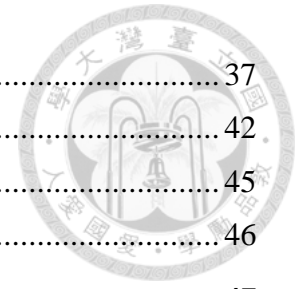
After obtaining the fabric properties of the gravel layer from the stripping of first excavation result of Chushan trench, a full scaled numerical simulation is conducted to identify the evolution of the north wall of the Chushan trench under repeated thrust faulting. The development sequence of fault sliding surface, the evolution of geological structure, the gravel rotation characteristics at the front of the gravel layer deformation, the growth strata and erosion can be appropriately replicated.

**Keywords:** thrust faulting, gravel layer, composite strata, sandbox experiments, discrete element method (PFC<sup>3D</sup>) , inversion of active faulting of Chushan trench

# 目錄



論文口試委員審定書.....	i
致謝.....	ii
摘要.....	iii
ABSTRACT .....	iv
目錄.....	vi
圖目錄.....	viii
表目錄.....	xi
符號表.....	xii
<b>第 1 章 緒論 .....</b>	<b>1</b>
1.1 研究動機 .....	1
1.2 研究目的 .....	5
1.3 研究方法與流程.....	5
<b>第 2 章 文獻回顧.....</b>	<b>8</b>
2.1 斷層錯動引致地表變形 .....	8
2.1.1 複合地層與礫石層受斷層錯動之案例 .....	11
2.1.2 竹山槽溝挖掘調查 .....	14
2.1.3 自由場物理砂箱試驗 .....	19
2.1.4 自由場小尺度數值分析.....	21
2.1.5 槽溝案例數值分析 .....	24
2.2 礫石層之組構分類與工程特性.....	26
2.3 礫石層之顆粒力學模擬與應用.....	27
2.4 綜合討論 .....	29
<b>第 3 章 研究方法.....</b>	<b>30</b>
3.1 現地調查與影像辨識 .....	30
3.2 物理砂箱試驗.....	32
3.2.1 砂箱設備.....	32
3.2.2 砂箱試驗材料與性質測定.....	33
3.2.3 砂箱試驗方法與過程 .....	35
3.3 數值分析 .....	37



3.3.1 數值分析方法簡介 .....	37
3.3.2 數值分析模型與參數設定 .....	42
3.3.3 礫石層基本假設 .....	45
3.3.4 數值分析試驗規劃 .....	46
<b>第 4 章 逆斷層引致含礫石層之複合地層變形 .....</b>	<b>47</b>
4.1 現地調查成果 .....	47
4.1.1 新城斷層 .....	47
4.1.2 三義斷層 .....	48
4.1.3 竹山槽溝 .....	49
4.2 物理砂箱試驗 .....	52
4.2.1 單一砂層砂箱試驗 .....	52
4.2.2 複合地層砂箱試驗 .....	54
4.2.3 觀察重點與討論 .....	58
4.3 數值分析比對砂箱試驗 .....	59
4.3.1 斷層滑動面發展與地表變形 .....	59
4.3.2 礫石旋轉特徵 .....	64
4.3.3 三角剪切帶 .....	71
4.4 數值分析參數敏感度 .....	74
4.4.1 砂層與礫石層的變形特徵 .....	74
4.4.2 礫石層組構特性 .....	77
4.5 地層應變 .....	83
<b>第 5 章 竹山槽溝北牆變形演育 .....</b>	<b>86</b>
5.1 斷層特性 .....	86
5.2 數值模型與參數 .....	87
5.3 模擬結果 .....	92
5.4 小結 .....	101
<b>第 6 章 結論與建議 .....</b>	<b>103</b>
6.1 結論 .....	103
6.2 建議 .....	105
<b>參考文獻 .....</b>	<b>106</b>
<b>附錄 A .....</b>	<b>111</b>

## 圖目錄

圖 1.1 2012 年版臺灣活動斷層分布圖.....	3
圖 1.2 各研究方法整合循環圖.....	6
圖 1.3 研究流程圖.....	7
圖 2.1 不同上覆土層受逆、正斷錯動引致地表變形示意圖.....	8
圖 2.2 上覆土層受逆斷層作用的變形型態.....	9
圖 2.3 三角剪切帶運動學模式.....	10
圖 2.4 新城斷層篤行營區 1 號槽溝.....	11
圖 2.5 篤行營區 1 號槽溝北牆剖面.....	12
圖 2.6 礫石擠壓破裂現象.....	12
圖 2.7 大甲溪河階斷層露頭照片.....	12
圖 2.8 湖口斷層露頭照片.....	13
圖 2.9 Schafberg fault 槽溝內礫石層的礫石旋轉特性與破裂情形.....	14
圖 2.10 竹山槽溝南牆與斷層破裂跡.....	15
圖 2.11 竹山槽溝北牆.....	15
圖 2.12 竹山槽溝位置圖.....	16
圖 2.13 竹山槽溝南、北牆剖面.....	17
圖 2.14 竹山槽溝之沉積單元.....	18
圖 2.15 保存於車籠埔斷層保存園區之竹山槽溝.....	19
圖 2.16 保存於車籠埔斷層保存園區之槽溝剝片礫石層部分.....	19
圖 2.17 不同上覆土層之變形行為.....	20
圖 2.18 逆斷層砂箱試驗與 ABAQUS2D 數值分析模擬.....	21
圖 2.19 逆斷層砂箱試驗與 PFC3D 數值分析模擬.....	22
圖 2.20 數值分析中的土壤顆粒形狀與粒徑分布.....	22
圖 2.21 覆土層剪裂帶的發展情形.....	23
圖 2.22 不同緊密度之分層砂土層的地表變形.....	23
圖 2.23 霧峰槽溝剖面與斷層破裂跡發展位置.....	24
圖 2.24 霧峰槽溝受盲斷層錯動之數值模型.....	24
圖 2.25 數值分析模擬竹山槽溝南北牆之構造差異.....	25
圖 2.26 垂直與水平沉積排列之礫石層開挖結果.....	28
圖 2.27 不同顆粒形狀之自由落體試驗.....	28
圖 2.28 不規則排列與水平排列之三合圓顆粒落門試驗.....	28
圖 2.29 PFC <sup>2D</sup> 雙軸試驗模型示意圖與模擬結果.....	29
圖 3.1 砂箱礫石之採集過程（現地篩分析）.....	31
圖 3.2 利用影像自動辨識軟體測定礫石之基本材料性質.....	31
圖 3.3 砂箱試驗配置圖.....	32
圖 3.4 砂箱試驗配置示意與說明圖.....	33

圖 3.5 砂箱礫石之長徑比 .....	34
圖 3.6 砂箱礫石之粒徑分布曲線.....	34
圖 3.7 色砂與標籤礫石鋪設情形.....	35
圖 3.8 砂土實降設備.....	36
圖 3.9 砂土實降器開口及實降高度之率定試驗結果.....	37
圖 3.10 砂箱試驗準備過程 .....	37
圖 3.11 PFC <sup>3D</sup> 之運算邏輯 .....	39
圖 3.12 比照彈性梁之變形特性示意圖 .....	40
圖 3.13 顆粒勁度與接觸勁度之關係.....	40
圖 3.14 砂箱數值逆斷層推動示意圖.....	42
圖 3.15 小尺度砂箱數值模擬配置圖.....	43
圖 3.16 砂箱內各高度的孔隙率監測.....	44
圖 3.17 數值分析中的礫石橢球顆粒.....	46
圖 4.1 新城斷層野外地點與軌跡.....	47
圖 4.2 河道礫石之覆瓦狀構造 .....	48
圖 4.3 頭前溪右岸的新城斷層露頭.....	48
圖 4.4 三義斷層露頭.....	49
圖 4.5 三義斷層斷層尖端附近之礫石旋轉情形 .....	49
圖 4.6 竹山槽溝北牆剝片礫石顆粒描繪 .....	50
圖 4.7 影像分析捕捉的礫石 .....	51
圖 4.8 逆斷層作用引致上覆土層斷層擴展及擴展路徑示意圖 .....	52
圖 4.9 單一砂層砂箱各抬升比之斷層滑動面發展與擴展距離（逆斷層傾角 30°） .....	53
圖 4.10 複合地層砂箱試驗配置圖.....	54
圖 4.11 複合地層砂箱各抬升比之斷層滑動面發展與擴展距離（逆斷層傾角 30°） .....	55
圖 4.12 複合地層砂箱各抬升階段之礫石旋轉角度.....	57
圖 4.13 砂箱試驗各抬升比之礫石最大旋轉角度.....	57
圖 4.14 單一砂層與複合地層砂箱試驗之斷層擴展距離.....	58
圖 4.15 單一砂層砂箱之斷層滑動面發展比對（逆斷層傾角 30°） .....	60
圖 4.16 單一砂層砂箱之地表變形比對（逆斷層傾角 30°） .....	60
圖 4.17 複合地層砂箱之斷層滑動面發展比對（逆斷層傾角 30°） .....	61
圖 4.18 複合地層砂箱之地表變形比對（逆斷層傾角 30°） .....	61
圖 4.19 地表變形與地表變形斜率之回歸式 .....	62
圖 4.20 單一砂層砂箱與複合地層砂箱之地表變形斜率與總地表影響範圍 .....	63
圖 4.21 單一砂層砂箱與複合地層砂箱之地表影響範圍（抬升比 0.25） .....	63
圖 4.22 複合地層砂箱與數值模型的礫石旋轉角度（逆斷層傾角 30°） .....	65
圖 4.23 數值分析各抬升比之礫石最大旋轉角度.....	66

圖 4. 24 抬升比 0.1~0.25 之礫石旋轉角度.....	68
圖 4. 25 抬升比 0.25 時的礫石位置與旋轉角度分布（斷層尖端初始位置 x=45cm）.....	69
圖 4. 26 新城斷層篤行營區 1 號槽溝之礫石旋轉角度.....	70
圖 4. 27 單一砂物理砂箱與複合地層物理砂箱之三角剪切帶範圍.....	71
圖 4. 28 單一砂砂箱與複合地層砂箱數值模型之三角剪切帶範圍.....	72
圖 4. 29 砂層與礫石層之地層變形比較.....	75
圖 4. 30 四種砂層與礫石層組合砂箱之地表變形斜率與地表影響範圍.....	76
圖 4. 31 四種砂層與礫石層組合砂箱之地表影響範圍（抬升比 0.25）.....	76
圖 4. 32 不同礫石體積含量之礫石層之地層變形樣貌.....	78
圖 4. 33 單斜構造的種類.....	78
圖 4. 34 礫石體積含量 20% 與 70% 的滑動面發展過程.....	79
圖 4. 35 不同礫石長徑比之礫石層之地層變形樣貌.....	80
圖 4. 36 不同礫石初始沉積角度之礫石層地層變形樣貌.....	82
圖 4. 37 三角剪切帶內的礫石最終沉積角度.....	82
圖 4. 38 更新測量球位置示意圖.....	83
圖 4. 39 抬升比為 0.1 時的應變分布.....	84
圖 4. 40 礫石旋轉量與應變分布.....	85
圖 5. 1 集集地震引致地表變形之地質構造剖面.....	86
圖 5. 2 車籠埔斷層的地震歷史.....	87
圖 5. 3 模型尺寸與初始狀態.....	88
圖 5. 4 礫石面積含量計算示意圖.....	89
圖 5. 5 礫石體積含量與礫石面積含量關係圖.....	89
圖 5. 6 集集地震後的變形結果與竹山槽溝比對圖.....	93
圖 5. 7 三角剪切帶與斷層滑動面.....	93
圖 5. 8 礫石旋轉情形比對圖.....	94
圖 5. 9 地震事件 E4 後的地層變形.....	95
圖 5. 10 地震事件 E3 後的地層變形.....	96
圖 5. 11 地震事件 E2 後的地層變形.....	97
圖 5. 12 集集地震後的地層變形.....	98
圖 5. 13 不同剖面之地層變形形貌.....	100
圖 5. 14 槽溝南北牆剖面復原圖.....	101

## 表目錄

表 1.1 台灣活動斷層參數資料表.....	4
表 3.1 標準石英砂之基本物理性質.....	34
表 3.2 砂箱礫石與篤行營區礫石之長徑比比較 .....	35
表 3.3 小尺度砂箱之微觀參數 .....	45
表 3.4 小尺度數值分析試驗規劃.....	46
表 4.1 影像分析捕捉的竹山槽溝北牆礫石尺寸數據.....	51
表 4.2 不同礫石組構特性之變形結果比較 .....	82
表 5.1 全尺度砂箱之微觀參數 .....	90
表 5.2 槽溝北牆剖面復原圖及地質事件整理 .....	91
表 5.3 竹山槽溝各地震事件後之變形結果比較 .....	99



## 符號表



$\Delta H$	斷盤垂直抬升量	vertical displacement of bedrock
H	地層厚度	thickness of strata
W	斷層擴展距離	fault extension distance
E	楊氏模數	Young's modulus
$\nu$	柏松比	Poisson's ratio
c	凝聚力	cohesion
$\phi$	摩擦角	friction angle
$\psi$	膨脹角	angle of dilatancy
n	孔隙率	porosity
R (Ball radius)	數值球顆粒半徑	numerical ball size (PFC <sup>3D</sup> )
$k_n$	正向勁度	normal stiffness (PFC <sup>3D</sup> )
$k_s$	切向勁度	shear stiffness (PFC <sup>3D</sup> )
$E^*$	有效模數	effective modulus (PFC <sup>3D</sup> )
$\kappa^*$	勁度比	normal-to-shear stiffness ratio (PFC <sup>3D</sup> )
$\mu$ (Fric)	摩擦係數	friction coefficient (PFC <sup>3D</sup> )
$\alpha$	斷層尖端與三角剪切帶範圍的夾角	
$\varepsilon_{xx}$	應變張量 (xx 方向)	strain tensor component
$\gamma$	工程剪應變	Engineering Strain
$A_G/V_G$	礫石所占面積/體積	gravel area/volume content
$A_t/V_t$	分析總面積/體積	total area/volume



# 第 1 章 緒論


## 1.1 研究動機

台灣位於板塊擠壓交界帶，斷層錯動十分活躍，根據地調所 2012 年出版之臺灣活動斷層分布圖 (圖 1.1) 及地震地質與地變動潛勢分析計畫及重要活動斷層構造特性調查的研究成果 (表 1.1)，目前共有 33 條活動斷層，且滑移特性多屬於逆移斷層。活動斷層是指過去近期曾經活動，並可能在未來再次發生錯動的斷層。斷層一旦發生錯動，除了激發暫時且強烈的地震波外，還有基盤 (bedrock) 錯動所造成的近地表永久或塑性變形。台灣土地空間有限，許多人工結構物及其基礎、隧道與維生管線不可避免的建設於斷層的影響範圍內，了解基盤之上的地層變形行為與範圍有助於減少與防止地震災害。

綜觀 33 條活動斷層中，絕大多數活動斷層位於山麓地區或沖積平原，上覆土層除了砂土、黏土外，礫石層亦為常見的地層，其中高達 29 條活動斷層的近地表有礫石層分布 (表 1.1)。透過現地斷層帶附近之露頭觀察與斷層槽溝開挖，地層通常由不同種地層堆疊成複合地層，且由不同大小、不同粒形或不同排列方式的礫石組成之堆積礫石層是普遍存在的。以竹山槽溝為例，階地礫石層與黏土質粉砂層被車籠埔斷層多次錯動的破裂跡切穿與變形；篤行營區 1 號槽溝亦紀錄有新城斷層通過砂層與礫石層互層變形樣貌，礫石呈現不同方向的排列，甚至被捲入斷層帶中。

過去利用離散元素法探討活動斷層引致上覆土層的變形行為或與結構互制之研究，多將覆土材料簡化為圓球狀顆粒且不具凝聚力的砂層或圓球狀顆粒且具有凝聚力的黏土層，討論斷層擴展距離、斷層破裂跡發展與三角剪切帶範圍，礫石層的組構特性並未被充分考慮。

與砂土層相比，同樣由顆粒主控力學行為的礫石層邊坡有良好的自立性，故多認為礫石層的力學機制與其他地層不同，目前並無合理的分析方法可用 (褚炳麟，



1996)。觀察高礫石含量的礫石層邊坡，經常含有大粒徑、呈現橢球形且固定方向排列之卵礫石顆粒，其自立性應歸因於橢球顆粒之間的互鎖效應。故本研究嘗試透過顆粒力學的角度模擬礫石層受斷層作用後的變形行為，探討不同礫石體積含量、長徑比與排列方式之礫石層對於地表變形、斷層擴展距離、斷層滑動面發展、地表影響範圍與三角剪切帶範圍的影響。此外，由於礫石顆粒的大小在野外可由肉眼辨識，因此可以透過觀察礫石顆粒的旋轉特性來判釋三角剪切帶範圍與推測斷層之錯動歷史，做為量化礫石層變形行為的重要指標。

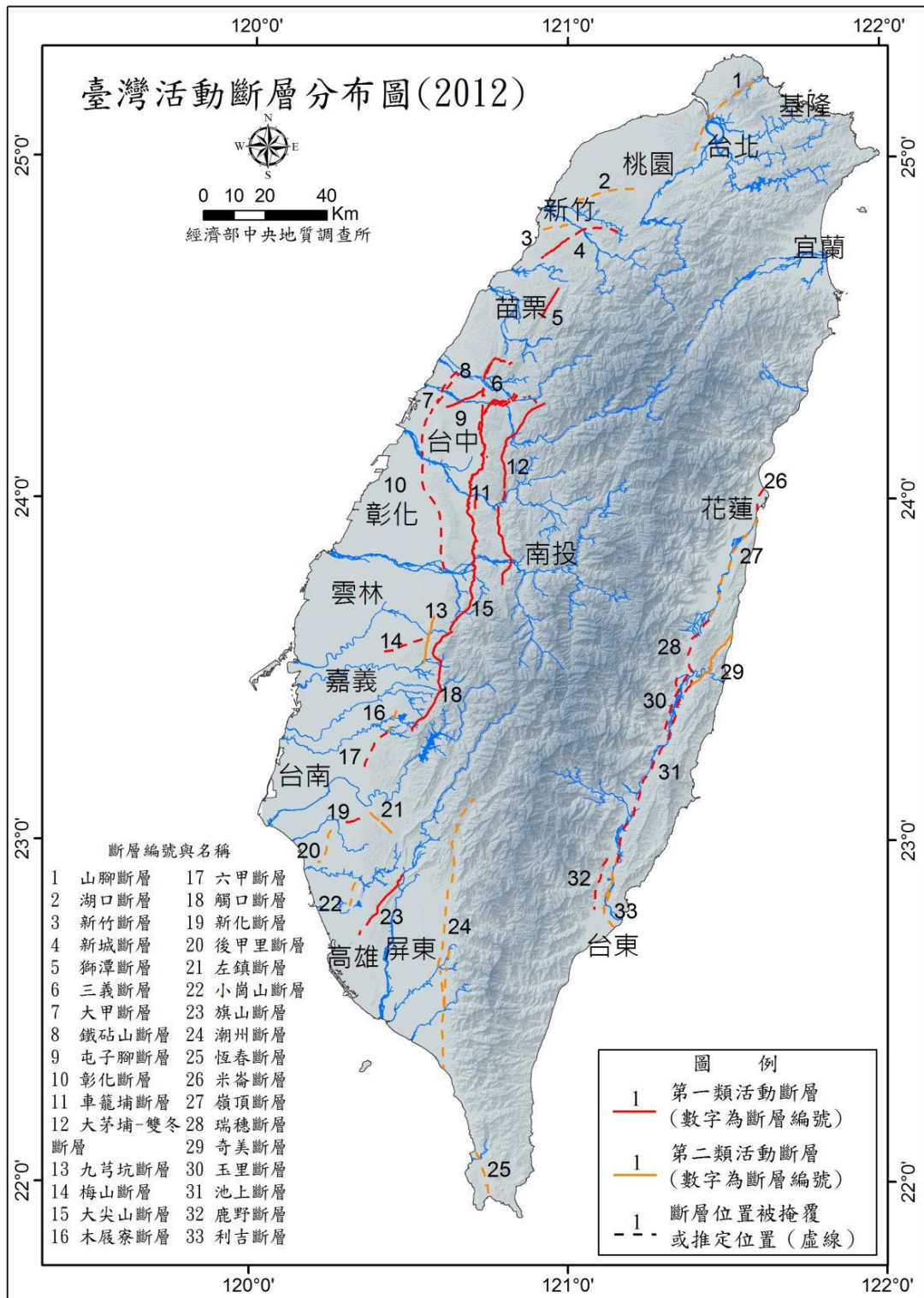


圖 1. 1 2012 年版臺灣活動斷層分布圖 (經濟部中央地質調查所, 2012)

表 1.1 台灣活動斷層參數資料表 (改自經濟部中央地質調查所, 2010)

台灣活動斷層參數資料表

斷層編號	斷層名稱	近地塊岩石層分布 <sup>1</sup>	活動分稱 (km)	斷層長度 (km)	遷移特性	斷層傾角 (度/傾向)	GPS跨斷層水平速度變化 (mm/yr)		GPS水準	跨斷層垂直速度變化 (mm/yr)	地質證據	短期淨移速率 (mm/yr)	長期淨移速率 (mm/yr)	再現週期(yr)	最近一次活動時間 (yr)	可能最大地震規模(M)
							平行斷層走向	垂直斷層走向								
1	山脚斷層 (北)	沖積層	—	22	正移	>60/東	-0.6±5.2	-1.2±6.2	-2.2	2.1±10.2	1.8/1.2	2.2		<11000	(6.9)	
	山脚斷層 (南)		—	13			-1.3±5.8	-5.0±7.4	-10.8	2.3±12.3						
2	湖口斷層	楊梅層	—	21	逆移	~40/南	0.2±3.2	4.1±4.2	-2.1	1.2±7.8	1.7±0.8			<70000	(6.6)	
3	新竹斷層	店子湖層、頭寮山層	—	10	逆移兼右移	~45/南	0.9±2.5	2.9±2.6	-2.3	0.9±8.4	~1			更新世晚期	(6.2)	
4	新城斷層	頭寮山層	—	29	逆移	~30/南	0.2±3.0	1.2±2.5	-7.8	-0.3±7.9	~1		2000	<300	(6.8)	
5	獅潭斷層	無	—	11	逆移	>60/西	-0.7±1.6	0.9±2.7		2.1±7.2		1.3		A.D.1935	7.1/(6.3)	
6	三義斷層	頭寮山層、沖積層	—	34	逆移	40-60/東	-0.2	0.7	-0.1	-14.5		20~34.5		全新世?	(6.8)	
7	大甲斷層 (北)	頭寮山層、沖積層	—	8	逆移	40-50/東	1.3±2.9	2.9±3.1	-2	-4.1±8.9	1.7~5.5/3.6±1.9		552	全新世?	(6.8)	
	大甲斷層 (南)		—	23		/東	0.3±2.6	0.2±1.8	-3.1	2.4±8.4						
8	鐘崙山斷層	頭寮山層、沖積層	—	13	逆移	/西	1.3±2.9	2.9±3.1	0.4	-4.1±8.9				全新世?	(6.4)	
9	屯子腳斷層	紅土台地堆積層	—	14	右移	/南	-3.2	1.5	0.1	4			141	A.D.1935	7.1/(6.4)	
10	彰化斷層	頭寮山層、沖積層	—	36	逆移	/東	-0.9±2.1	3.5±2.4	6.3	9.2±4.1	4.3~10.3	5.2~12.7		全新世?	(6.9)	
11	車籠埔斷層 (北)	沖積層	—	38	逆移	~40/東	-3.6±3.2	4.1±5.0	4.1	12.8±9.2	3.47	6.6~24.9	200~700/546	A.D.1999	7.3/(7.3)	
	車籠埔斷層 (南)		—	38			-7.2±7.1	13.4±8.2	3.9	3.4±6.1						
12	大茅埔-雙冬斷層	頭寮山層	—	69	逆移	~45/東	-3	4.2	4.1	3.5		8.7~47.8	2894	A.D.1999	(7.2)	
13	九芎坑斷層	頭寮山層、沖積層	—	16	逆移	20-30/東	0.8±2.6	2.3±3.9	-15.3	4.7±8.9		14.3~20.7	199	<18540	(6.5)	
14	梅山斷層	紅土台地堆積	—	15	右移	>60	1.6±3.2	0.9±3.3	-0.8	5.8±2.3		5.3	162	A.D.1906	7.1/(6.4)	
15	大尖山斷層	頭寮山層	—	29	逆移兼右移	>60/東	2.6±3.9	0.5±3.8	-11.6	13.6±10.7				A.D.1999	(6.7)	
16	木屐寮斷層	階地堆積層	—	7	逆移	/東	2.3±2.9	2.3±2.9	0.3	9.3±8.4	5.6±2.0/6.33±0.06	15.1~22.9	430	更新世晚期	(6.0)	
17	六甲斷層	沖積層	—	16	逆移兼左移	~30/東	2.0±3.6	2.3±2.9	0.3	9.3±8.4	5.6±2.0/6.33±0.06	12.7/11.2±4.0	430	<10000	(6.5)	
18	觸口斷層	頭寮山層	—	27	逆移	50-60/東	3.2±4.2	1.1±3.4	3.1	3.8±7.2		5.3~16.7	1314	<10000	(6.8)	
19	新化斷層	階地堆積層	—	6	右移	>60	8.8±3.9	1.6±4.2	-5	3.2±8.9		11.4	188	A.D.1946	6.1/(6.0)	
20	後甲聖斷層	無	—	12	逆移	>35/西	3.5±2.8	6.2±3.8	7	-0.4±7.6	5~6	5.2~9.5	936	全新世晚期	(6.3)	
21	左鎮斷層	無	—	13	左移	>60/北	-1.4±8.6	6.3±7.9		4.1±7.9				更新世中晚期	(6.2)	
22	小崗山斷層	沖積層	—	8	逆移	~45/東	3.6±2.8	8.6±3.1		9.7±8.9	4.4±0.6/>3.3±1.1	14.1~20.2	867	更新世晚期	(6.1)	
23	旗山斷層	無	—	26	逆移	~50/東	4.2±5.7	5.4±7.2	-3.6	-1.2±13.4		<5.0		全新世	(6.8)	
24	湖洲斷層	沖積層、階地堆積層	—	90	逆移	70-80/東	-1.1±3.4	0.3±1.8	-3.6	6.9±8.4		<5.0		更新世晚期	(7.3)	
25	恆春斷層	階地堆積層	—	16	逆移	/東	-3.9±3.9	5.4±4.4	1	-0.7±6.2	7.5±0.14/>4.1±0.1	42.1		更新世晚期	(6.5)	
26	米崙斷層	米崙層、沖積層	—	8	左移兼逆移	~60-70/東	-8.4±5.7	6.8±6.3	-17.9	8.7±16.9				A.D.2018	7.3/(6.1)	
27	嶺頂斷層	沖積層	—	36	左移兼逆移	/東	-8.4±5.7	6.8±6.3	-19.6	8.7±16.9				A.D.2018	(6.8)	
28	瑞穗斷層	沖積層	—	24	逆移兼左移	40-60/東	-6.5±2.3	4.1±8.7	3.9	7.9±10.1	12.5~16.0		170~210	A.D.1951	(6.8)	
29	奇美斷層	階地堆積層	—	23	逆移	~80/東	-14.5±3.6	5.6±4.9	-0.8	13.1±7.6	12.5~16.0			A.D.1951	(6.8)	
30	玉里斷層	興德礫岩、沖積層	—	23	左移兼逆移	~30/東	1.7~1.91	15~16.5		23.5~27	26~30/15.6~17.0	1.9~2.2	50~125	A.D.2003	6.6/7.2	
31	池上斷層	沖積層	—	64	左移兼逆移	~67/東	13~15	10~20	2	~3.0/5.5/1.85		5.4	2100	<1890~2110	(6.5)	
32	鹿野斷層	階地堆積層	—	18	逆移	/東	20~30	10~20	2	~3.0		12.2~13.3			*6.5)	
33	利吉斷層	沖積層	—	25	逆移	~67/東										

備註:

- 根據各區五萬地質圖辨識
- 尚未更新公告為第一類斷層



## 1.2 研究目的

本研究欲探討礫石層的組構特性對逆斷層引致複合地層變形之影響，本研究討論之地層變形包括斷層擴展距離、斷層滑動面發展、地表影響範圍與三角剪切帶範圍，礫石層又包括礫石的旋轉特性。研究目的條列如下：

1. 比較含有礫石層之複合地層與單一砂層地層受逆斷層作用後的地層變形。
2. 針對不同組構之礫石層進行一系列的數值模擬，探討由不同體積含量、不同排列方式與不同長徑比之礫石組成的礫石層變形行為影響。
3. 藉由礫石層中的礫石顆粒旋轉特性判釋三角剪切帶範圍，並建立旋轉角度與基盤抬升比的關係。
4. 利用離散元素法模擬重現竹山槽溝北牆變形演育，比對含有礫石層之複合地層變形特徵與行為，驗證離散元素法應用於複合地層受多次斷層作用、生長斷層與生長地層之變形演育歷史之力學分析可行性。

## 1.3 研究方法與流程

本研究之方法學包含三個部分，現地調查、物理砂箱試驗以及數值分析，如圖 1.2，配合研究流程圖如圖 1.3，研究方法詳述如下：

### 1. 現地調查：

現地調查的目的在於觀察實際存在的現象、定義待解決的問題以及取得材料。本研究從野外調查與過去槽溝開挖的結果觀察礫石層的變形特徵；從新城斷層附近的河床採集礫石，並利用影像自動辨識軟體分析礫石層組構特性。此過程可以協助簡化問題，更可以提供物理砂箱試驗與數值分析的配置參考、材料及材料性質。

### 2. 物理砂箱試驗：

斷層錯動的空間與時間尺度都相當大，且現地材料的組成複雜，因此執行現地試驗有其困難性。小尺度的模型試驗被用來探討含有礫石層之複





合地層受逆斷層作用的變形，掌握可以被觀察的現象，例如斷層破裂跡、地表變形與礫石的轉動。砂箱試驗的結果可作為數值分析成果的比對依據，但若要應用於現地，則必須要考慮尺寸效應。

3. 數值分析：

數值分析不受場地的限制，容易進行重複性試驗，而且可以定量分析。使用數值分析時，要設定合理的邊界條件與輸入參數，其對於結果有重大影響，因此本研究透過砂箱試驗的成果校核數值分析中的微觀參數，驗證此方法的正確性。本研究使用數值分析軟體 PFC<sup>3D</sup>( Particle Flow Code 3D) 來進行小尺度與全尺度的模擬，當小尺度模擬與砂箱試驗吻合後，則可以探討不同控制變因的影響；全尺度模擬用來討論竹山槽溝北牆的演育，了解此真實案例的發生過程，並驗證數值方法的可行性。

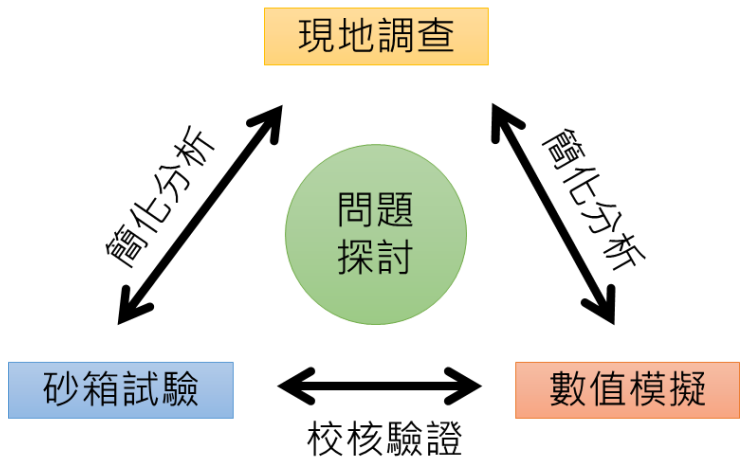


圖 1.2 各研究方法整合循環圖

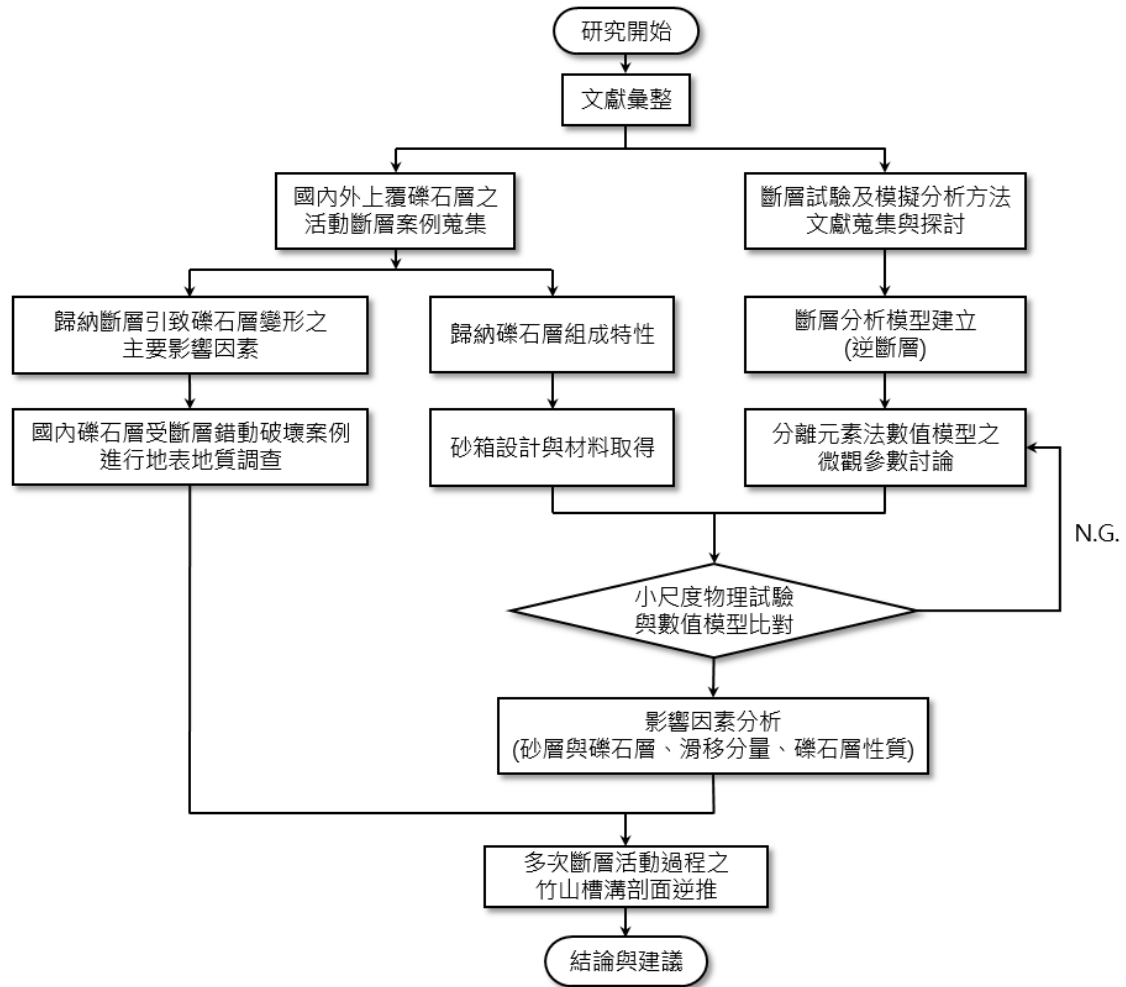


圖 1.3 研究流程圖





## 第 2 章 文獻回顧

### 2.1 斷層錯動引致地表變形

斷層的錯動表示斷層兩側的岩層產生了相對位移。活動斷層所在的岩層上方經常被尚未膠結的土層所覆蓋，因此斷層錯動的能量會導致相對軟弱的土層發生變形，形成斷層帶 (fault zone)。在斷層作用下，發生相對位移為主的堅硬岩層稱之為基岩 (Bedrock)，而覆蓋之上的土層稱之為上覆土層 (overburden soil)。

Bray et al. (1994) 整理過去世界各地發生大地震後的斷層破裂跡的產狀以及上覆土層變形特徵，並根據斷層種類與上覆土層性質加以分類，歸納出影響地表變形的重要因素有斷層面位態、斷層種類、斷層錯動量、上覆土層的性質 (圖 2.1)，然而此研究將上覆土層視為單一土層，尚未考慮地層的分層特性。

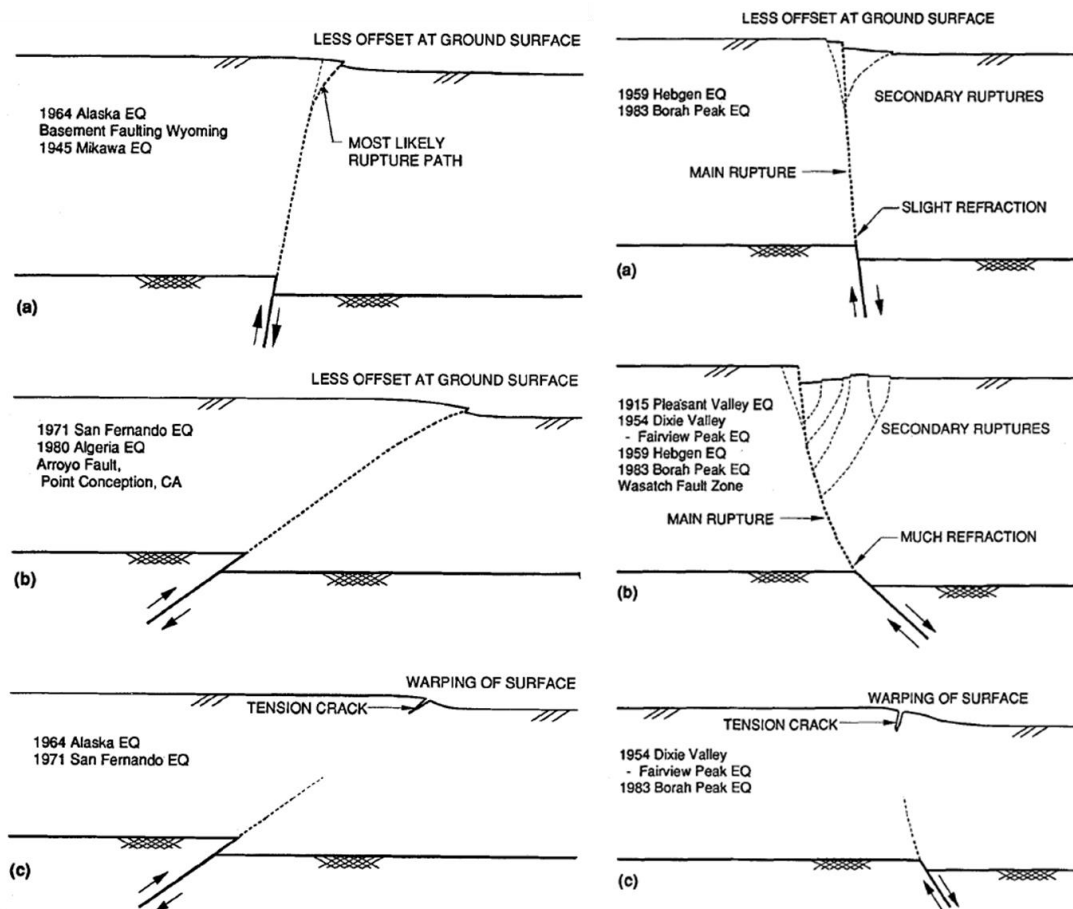


圖 2.1 不同上覆土層受逆、正斷錯動引致地表變形示意圖 (a)脆性土層材料、斷層傾角大 (b)脆性土層材料、斷層傾角小 (c)韌性土層材料 (Bray et al., 1994)

Kelson et al. (2001) 整理了集集大地震後車籠埔沿線的地表變形，逆斷層的錯動對於上覆土層變形特徵在下盤、斷層崖 (fault scarp) 和上盤有不盡相同之處，且其上的人工構造物也有不同的破壞模式。野外調查的結果顯示位在下盤的土壤不會或受到很小程度的變形，斷層崖附近會劇烈變形，上盤則有多樣貌的變形模式，研究將逆斷層引至的地表變形分為 5 類 (圖 2.2)。竹山槽溝的地表變形屬於圖中的(a)類，地表變形集中在地表變形前緣，且沒有產生背衝斷層，然而此研究尚未討論竹山槽溝中含有礫石層之複合地層變形特性。

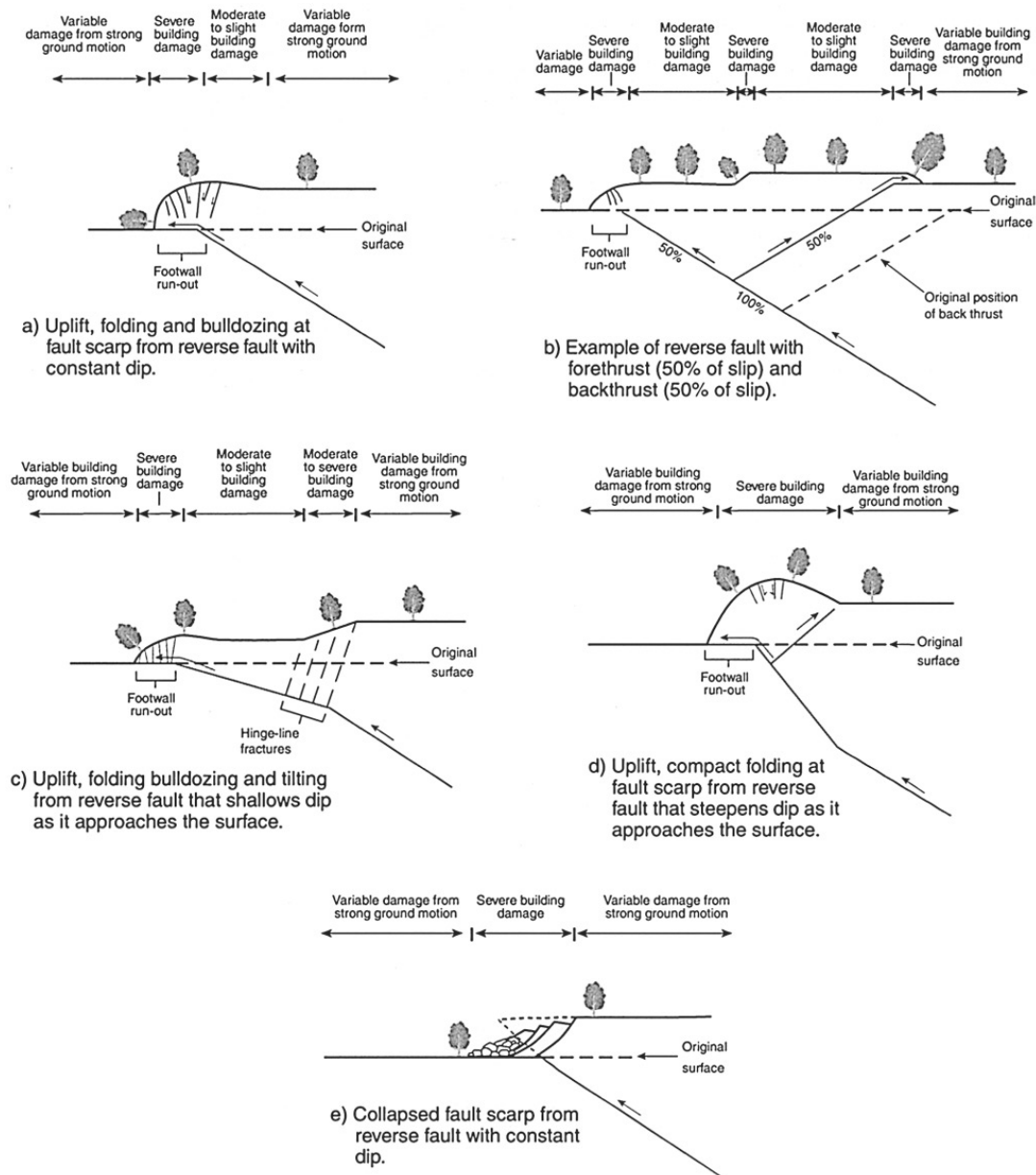


圖 2.2 上覆土層受逆斷層作用的變形型態 (Kelson et al., 2001)

野外所觀察到的現象需搭配相關理論來支持研究的合理性。斷層引致地表變形的研究經常使用三角剪切帶運動學模式 (Trishear model) 來解釋上覆土層的變形行為 (Erslev, 1991; Zehnder & Allmendinger, 2000; Lin et al., 2006)。三角剪切帶的運動學模式一開始是為了解釋斷層擴展褶皺 (fault-propagation fold) 的形貌，因為急折帶運動學模式 (kink-band model) 無法說明在野外觀察中經常看到斷層引致的地表變形為一曲面的現象，以及土體中複雜的應變分布 (Erslev, 1991)。此運動學模式假設斷層是單一的滑動面且剪切帶內的材料體積不變，當斷層在基岩中錯動而將能量向外、向上傳遞時，會形成一個應變集中，形狀為三角形的剪動帶 (Allmendinger, 1998)。控制三角剪切帶發展的頂點為斷層破裂尖端 (fault tip)，隨著斷層的滑動，斷層破裂尖端也會逐漸向上發展，因此三角剪切帶會隨著斷層的錯動而演變。如圖 2.3 的應變橢圓所示，愈靠近斷層尖端的土壤，其變形愈大。而灰色虛線包含的土壤都有變形，該區域即為從斷層開始滑動至停止滑動時，曾經是，或正是三角剪切帶的範圍。在本研究中，定義三角剪切帶的範圍如同灰色虛線所示。

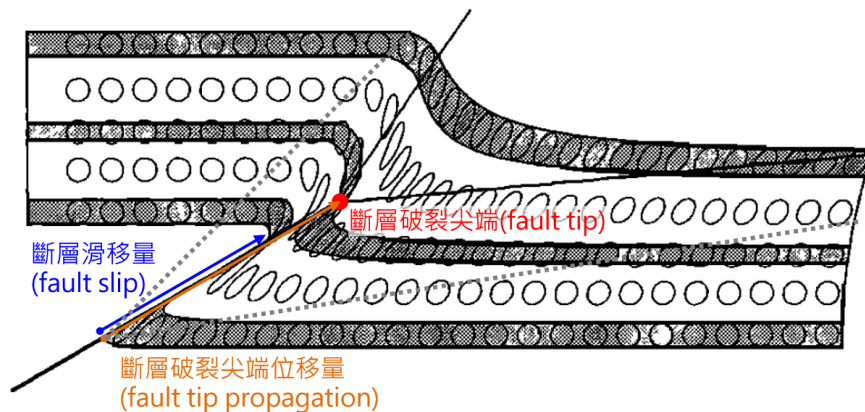


圖 2.3 三角剪切帶運動學模式 (修改自 Allmendinger, 1998)

然而有時基岩之上的岩層強度非常軟弱，亦可能形成斷層帶，例如風化泥岩受到車瓜林斷層的錯動而形成三角剪切帶，使得國道三號田寮 3 號橋與中寮隧道北口變形 (李健宏等人, 2018)。因此斷層錯動引致的地表變形可能包含了「上覆土層」與「軟弱岩層」的變形，本研究利用「地層 (strata)」統稱之。





### 2.1.1 複合地層與礫石層受斷層錯動之案例

過去現地調查在描述地表破裂的形貌時，多將上覆土層視為同一種材料，然而自然界的地層很少是單一材料而且均質的，通常會由不同種類的地層堆疊而成，根據組成的顆粒大小可區分為礫石層、砂層、粉砂層與黏土層。砂層、粉砂層屬於不具凝聚力的顆粒性材料，在後續的文獻回顧中最常被拿來討論；黏土層是有凝聚力的材料，部分學者亦有討論斷層在黏土層中的發展情形。目前礫石層與斷層的互制關係很少被探討，但有許多野外露頭可以證實斷層也經常通過礫石層，且沉積於礫石層中的礫石受斷層錯動後有不同的排列樣貌。

國內斷層槽溝的開挖，經常可見上覆礫石層的變形行為：新城斷層篤行營區 1 號槽溝北牆可以觀察到卓蘭層逆衝到晚更新世的河流相砂礫層之上，受擾動的河道礫石層之中的礫石長軸方向不一，甚至看到幾乎直立的礫石夾雜在地層中，且部分礫石被捲入斷層滑動面（圖 2.4）。陳文山等人（2003）繪製之槽溝剖面示意圖如圖 2.5，槽溝開挖範圍內之上下盤無可比對的沉積層，又礫石層中缺乏可定年的材料，上下盤的河道礫石層厚度差異甚大，對應關係尚待釐清，故無法判斷曾經發生有幾次古地震事件及其發生時間。

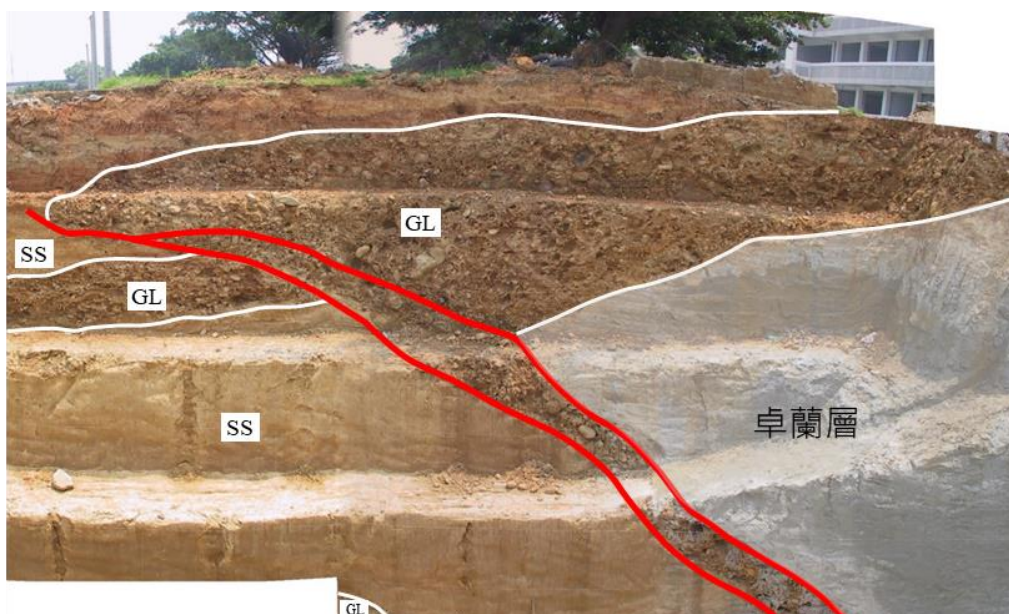


圖 2.4 新城斷層篤行營區 1 號槽溝（洪如江攝）

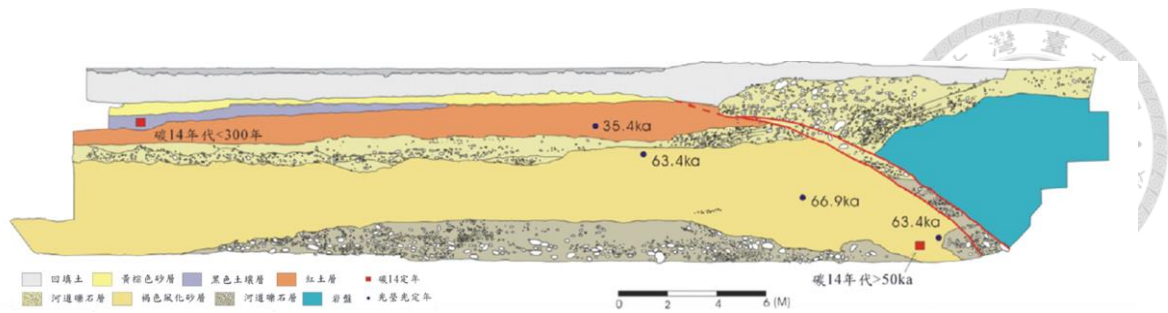


圖 2.5 篤行營區 1 號槽溝北牆剖面 (陳文山等人, 2003)

三義斷層於大甲溪河階之露頭可觀察到礫石受地震應力擠壓破裂，三義斷層  
的分支斷層截切與錯移紅土階地礫石層及灰黑色土壤層 (圖 2.6、圖 2.7)。此露頭  
觀察從層位高度差判斷三義斷層分支在此處造成約 50cm 的垂直移距，但尚未討論  
礫石旋轉特性與斷層錯移之關聯性。



圖 2.6 礫石擠壓破裂現象 (梁勝雄、陳建良, 2016)



圖 2.7 大甲溪河階斷層露頭照片 (梁勝雄、陳建良, 2016)

由於礫石層內之礫石因為肉眼容易辨識其位置與分布，有些關於古地震的研  
究也使用礫石層的排列方式判釋曾經活動的斷層，例如，桃園地區湖口斷層之露頭  
構造，可觀察一背衝斷層沿著斷層面逆衝於紅壤礫石層之上形成褶皺，紅壤礫石層  
中可見粗礫石旋轉，且又逆衝覆蓋地表紅壤與細粒砂層上，顯示了湖口斷層上盤之



背衝斷層為活斷層 (圖 2.8)，然而礫石的排列情形與斷層滑動面的位置關係並未被定量討論。Kübler et al. (2018) 於德國 Schafberg fault 通過的河階地開挖槽溝，Schafberg fault 為一條曾經造成板塊內地震的高角度正斷層。槽溝剖面有泥層、粉砂層、砂層與粗顆粒的礫石層，其研究描繪了槽溝剖面上裂成兩半且有相對位移的礫石顆粒，以及其他礫石顆粒的長軸位態。藉由礫石的變形樣貌觀察到在主要變形區中的礫石之長軸方向有較大的旋轉角度，且斷層錯動使得礫石有垂直位移，或可見部分礫石被斷層破裂跡剪裂 (圖 2.9)。此研究強調了古地震的研究可以透過觀察如礫石破裂與旋轉這樣細微的地貌特徵，來證明活動斷層的存在，然而此研究尚未建立礫石旋轉量與斷層錯移量的關係。

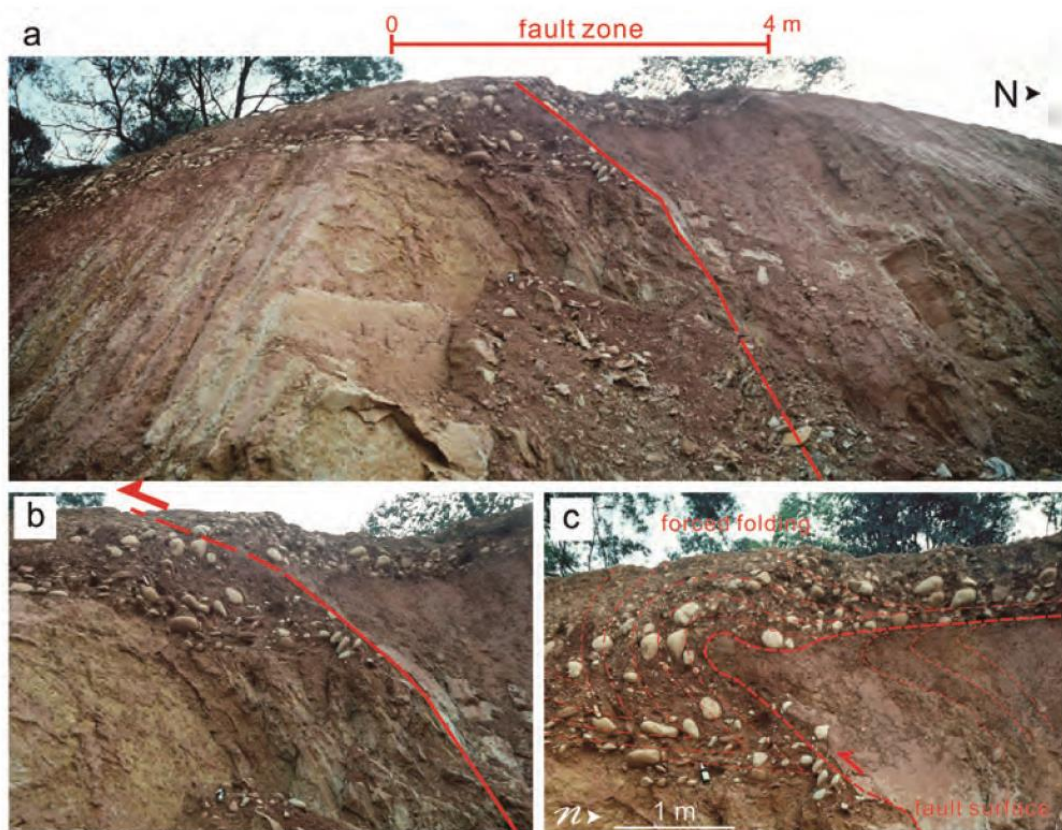


圖 2.8 湖口斷層露頭照片 (朱傲祖, 2012)

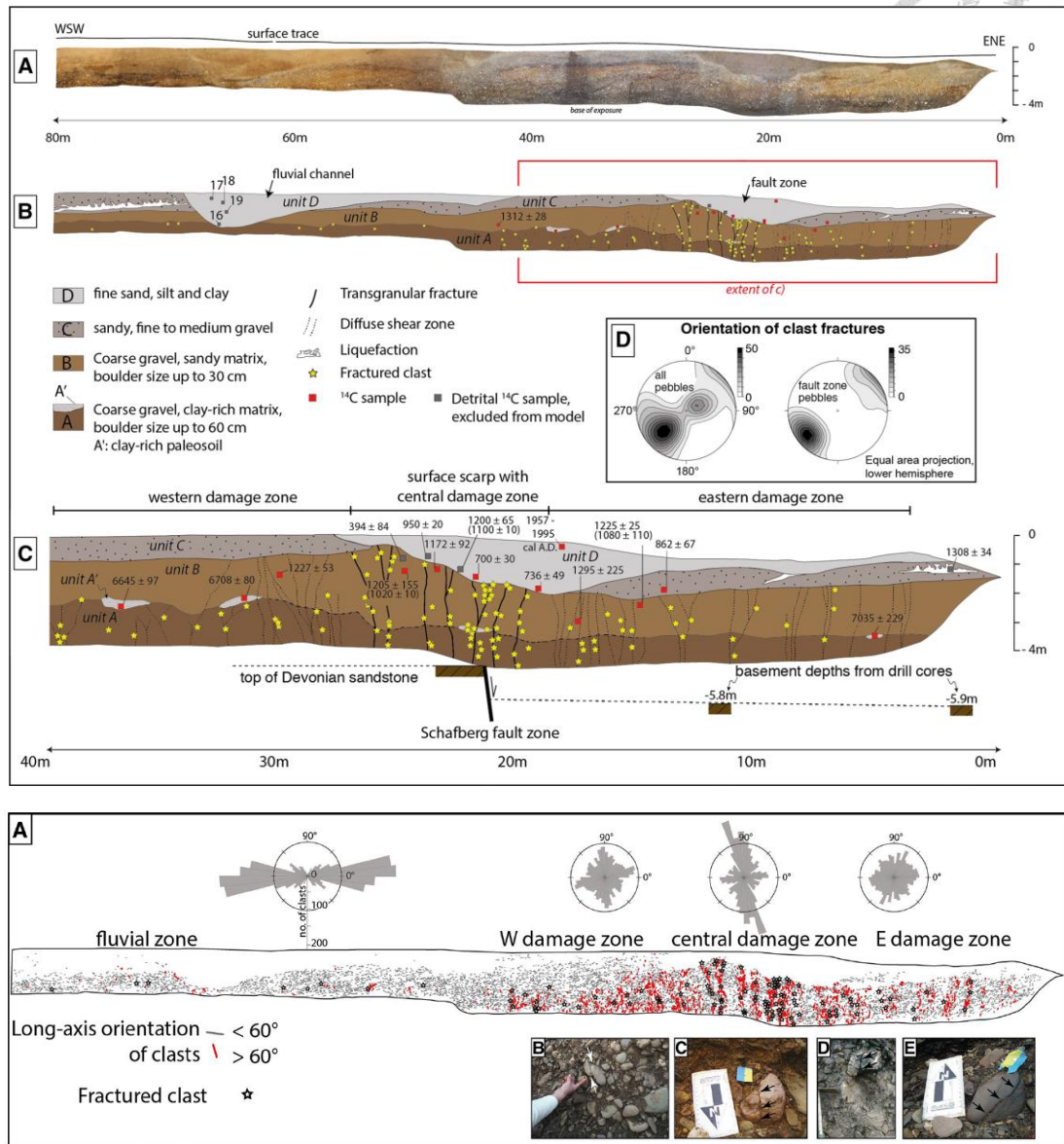


圖 2.9 Schafberg fault 槽溝內礫石層的礫石旋轉特性與破裂情形 (Kübler, S. et al., 2018)

## 2.1.2 竹山槽溝挖掘調查

位於竹山鎮的竹山槽溝是集集地震後最知名的挖掘調查，在 2002 年時第一次被開挖研究斷層活動的歷史 (圖 2.10、圖 2.11)，竹山槽溝開挖的方向為東北—西南走向，經過此處的車籠埔斷層錯動了階地堆積層以及沖積層，且附近的鑽孔可鑽得屬於西部麓山帶地層的卓蘭層 (圖 2.12)。





圖 2.10 竹山槽溝南牆與斷層破裂跡（劉啟川攝於 2002 年）



圖 2.11 竹山槽溝北牆（林銘郎攝於 2002 年）



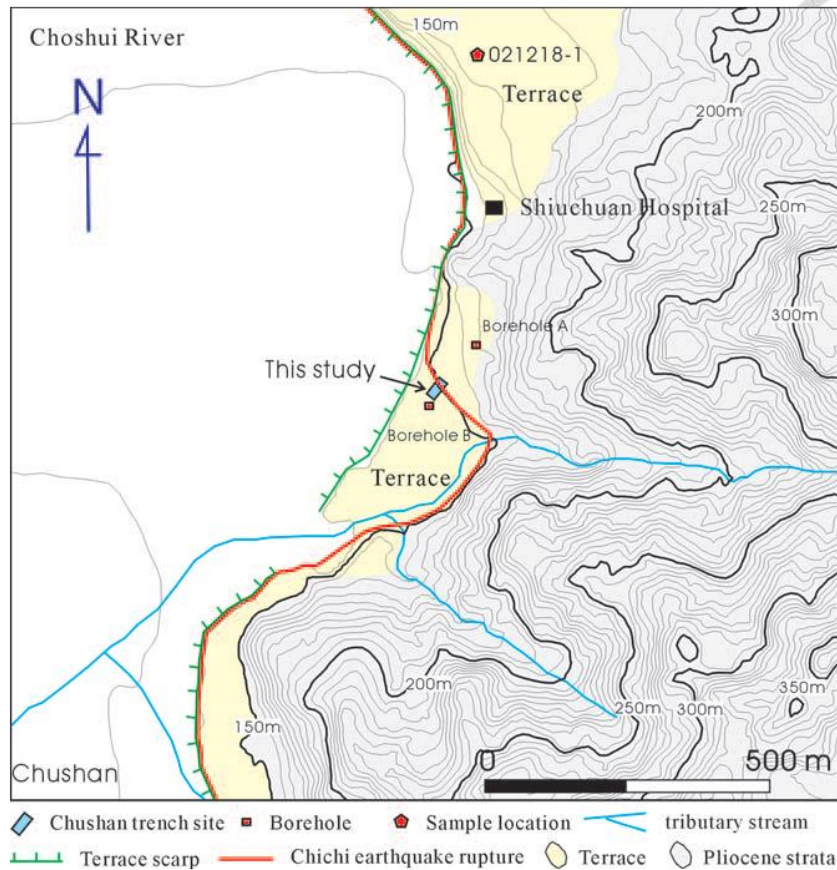


圖 2.12 竹山槽溝位置圖 (Chen et al., 2007)

竹山槽溝的剖面清晰且獨特，紀錄了車籠埔斷層曾經在此有 5 次錯動歷史，又僅距離 14m 之南北牆地質構造發育不同。竹山槽溝兩側溝壁呈現了兩種褶皺——逆衝斷層的褶皺構造結構，北牆類似於斷層擴展褶皺 (fault-propagation fold)，南牆屬於斷層轉折褶皺 (fault-bend fold) (圖 2.13)。

Huang et al. (2016) 將竹山槽溝的開挖剖面之沉積單元分為 9 層 (圖 2.14)，由最上層至最下層分述如下：Unit0 為人工填土層；Unit1 為受到農耕擾動的淺灰色粉砂質黏土層，與下層交角不整合；Unit2 為黃棕色黏土質與砂質粉土層夾透鏡狀礫質砂；Unit3 為棕色砂質與黏土質粉砂層，還有深紫色的有機質泥質與砂質粉砂層，這兩種顏色的粉砂層交互出現，可清楚的看出四條帶狀分層在此層上。Unit4 為藍灰色的泥質與砂質粉砂層；Unit5 為棕色砂質與黏土質粉砂層，夾有兩層藍灰色黏土層；Unit6 為亮灰色黏土質與礫質粉砂層，夾薄層橄欖色粉砂質砂。

包含有礫石的沉積層為 Unit7 與 Unit8。Unit7 為砂質與黏土質粉砂層夾透鏡狀沉積礫石，其中的礫石粒徑為細礫至卵石（4mm~>64mm），呈現稜角狀。最底層 Unit8 為階地礫石層，由濁水溪夾帶著來自中央山脈的石英質礫石堆積而成，粒徑分布從細礫至巨礫（4mm~>256mm），是肉眼非常容易看見的大小。

有鑑於竹山槽溝極具研究與展示的價值並免於被颱風摧毀，於是 2005 年時利用了槽溝剝片保留第一次開挖的地質剖面樣貌，且原址於 2012 年擴挖並於隔年建立車籠埔斷層保存園區，至今竹山槽溝南北牆與槽溝剝片仍被完好的保留在館內（圖 2.15、圖 2.16）。

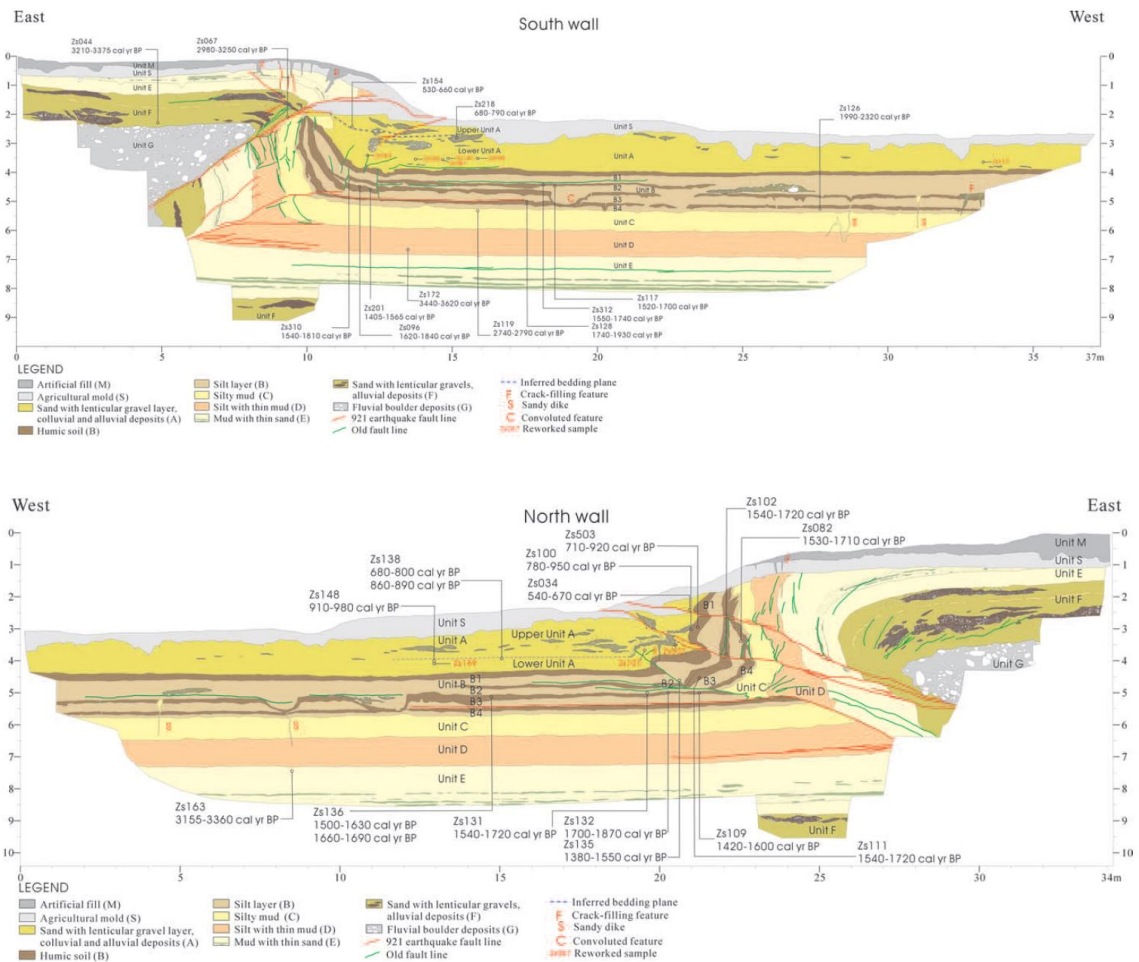


圖 2.13 竹山槽溝南、北牆剖面 (Chen et al., 2007)

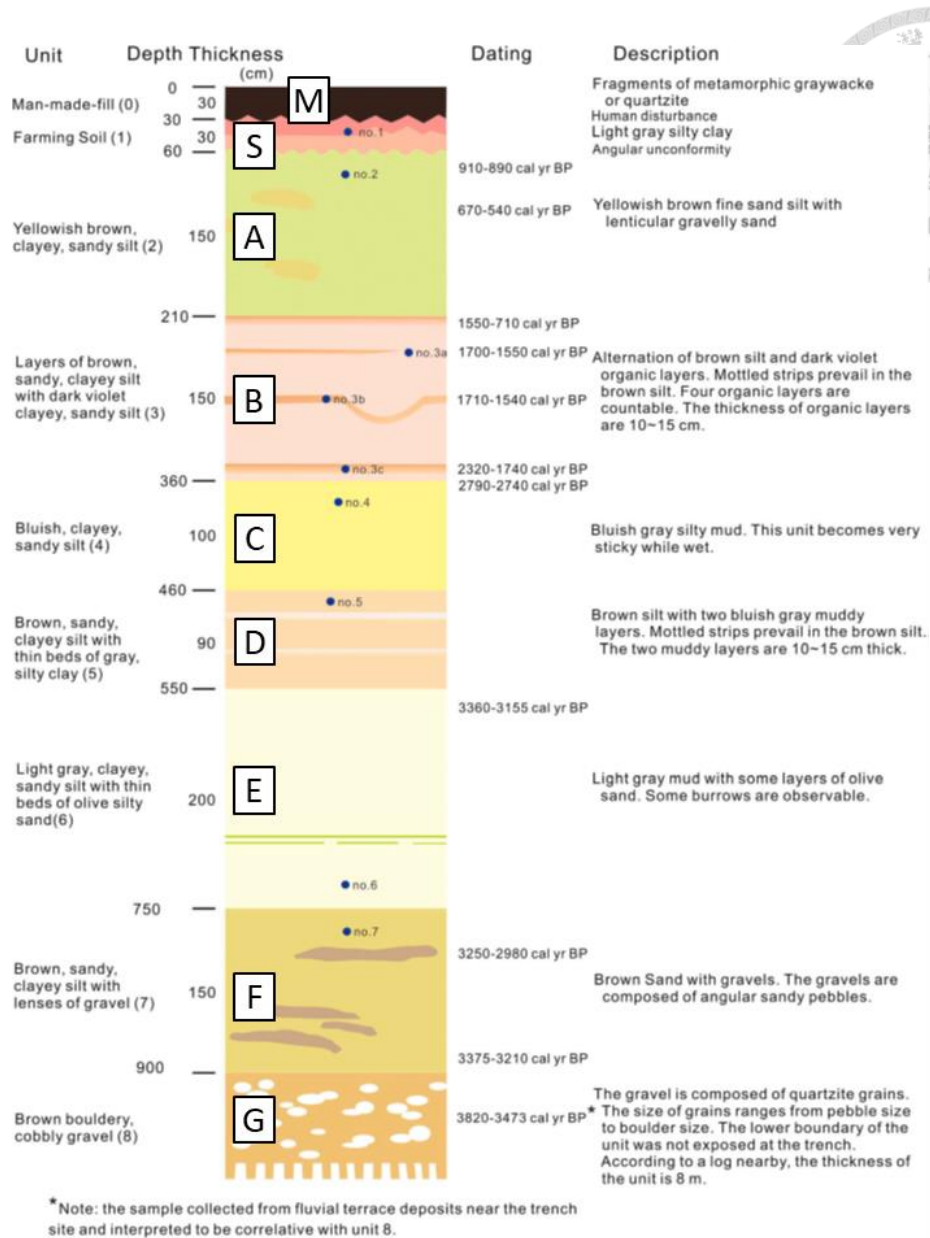


圖 2. 14 竹山槽溝之沉積單元 (修改自 Huang et al., 2016)。地層上標註的英文字可對應 Chen et al. (2007) 繪製之槽溝剖面示意圖。



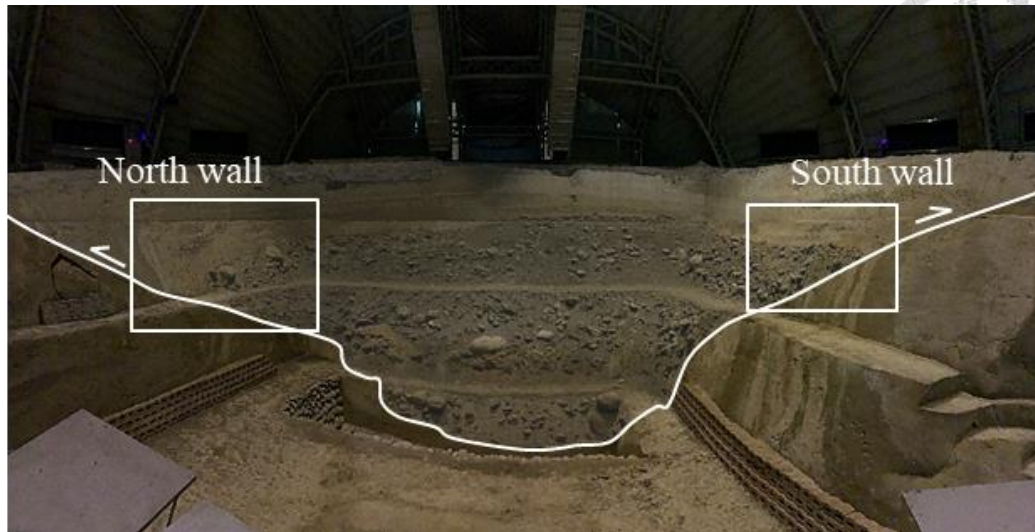


圖 2.15 保存於車籠埔斷層保存園區之竹山槽溝（攝於 2019 年）



圖 2.16 保存於車籠埔斷層保存園區之槽溝剝片礫石層部分

### 2.1.3 自由場物理砂箱試驗

研究上覆地層受斷層作用後的變形行為雖然可以透過現地調查或空拍照片來描繪地表破裂跡，但地層中的變形範圍或斷層滑動面位置卻由於尺度過大而難以調查，故在室內操作的物理砂箱試驗即彌補了以上的不足，可提供基本的行為觀察。[Cole & Lade \(1984\)](#) 利用 1g 重力場砂箱試驗觀察無凝聚性之鬆砂與緊砂受不同斷層傾角的正、逆斷層的斷層破裂面擴展路徑，結果顯示上覆土層的厚度、剪脹角以及斷層的傾角會影響斷層破裂面的發展。[Bray et al. \(1993\)](#) 利用 1g 重力場砂箱試驗觀察具有凝聚力之飽和黏土的變形行為，其研究指出剪切帶的厚度與基盤抬升量以及黏土的破裂應變有關。



由於在自然環境中堆積的沉積物很少是均質且均向的，故 Tali et al. (2019) 使用離心機砂箱試驗探討上覆土層為砂與黏土質砂的變形行為，比較單一砂層、砂層上覆黏土質砂層（厚度 1：1）、黏土質砂層上覆砂層（厚度 1：1）與單一黏土質砂層的地表變形、斷層滑動面發展與三角剪切帶範圍。試驗材料使用淨砂（Firoozkuh sand No.161）做為砂層，而黏土質砂則使用淨砂與高嶺土以重量比 3：1 混合。研究結果顯示單一砂層的斷層滑動面最早發展到地表，此時的基盤抬升比（ $\Delta H/H$ ）為 5.6%，且斷層滑動面發展至近地表的傾角較大。當不同覆土層堆疊時，斷層滑動面的傾角在土層交界處會改變，砂層中的斷層滑動面傾角會比較大（圖 2.17(a)）。另外，單一砂層受斷層作用後的地表抬升量較多、斷層崖較陡，斷層滑動面傾向於沿著既有的破裂面持續滑動，故地表影響範圍較小（圖 2.17(b)）。

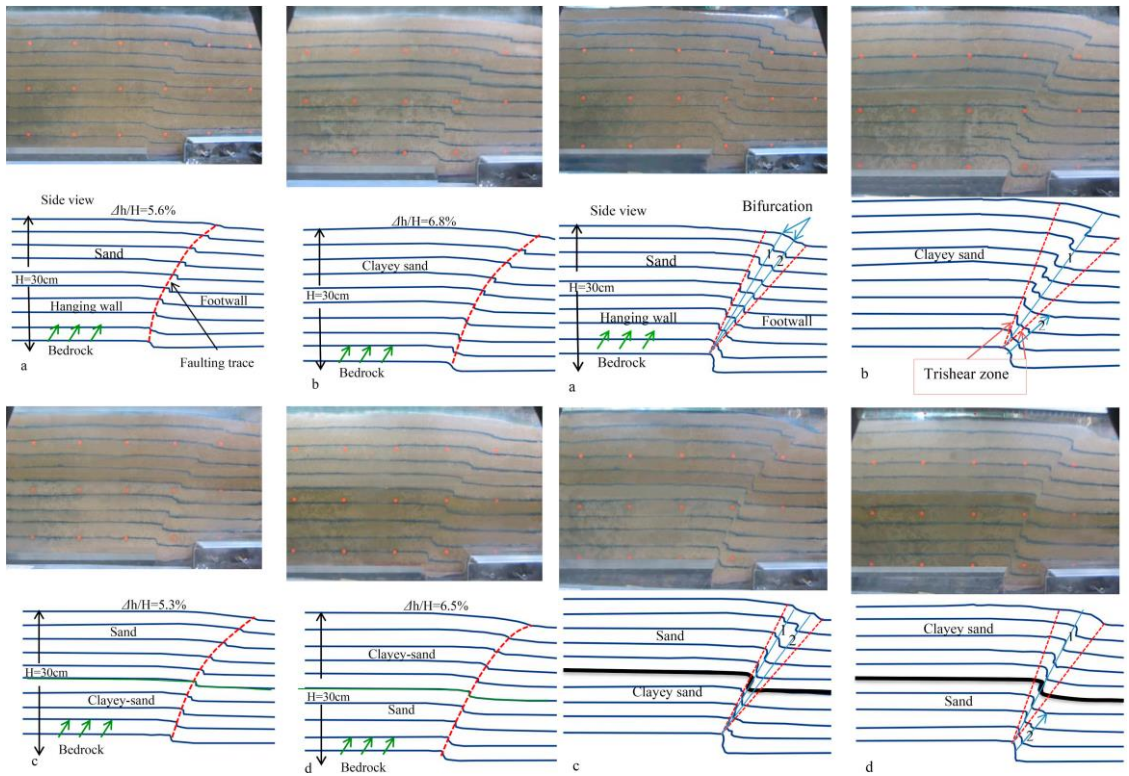


圖 2.17 不同上覆土層之變形行為(a)第一條斷層滑動面發展情形(b)抬升比 0.14 時的三角剪切帶範圍與破裂跡發展位置 (Tali et al., 2019)





## 2.1.4 自由場小尺度數值分析

小尺度數值分析是基於物理砂箱試驗的成果。從物理砂箱試驗觀察到基本行為後再進行小尺度分析，進一步探討參數敏感度且可以量化分析結果。

臺灣大學工程地質研究室併用物理砂箱試驗與數值分析方法，探討斷層錯動引致的地表與地層的變形以及斷層與結構物的互制關係，探討項目包含不同的斷層型式、上覆土層種類以及不同的結構型式，但在此小節僅回顧自由場的模擬內容。數值分析一開始使用連續體分析程式，鍾春富（2007）使用 ABAQUS<sup>2D</sup> 探討單一上覆土層之變形行為，探討的斷層傾角和土壤參數包括楊氏模數( $E$ )、柏松比( $\nu$ )、凝聚力( $c$ )、摩擦角( $\phi$ )與膨脹角( $\psi$ )的影響，研究結果顯示斷層傾角、楊氏模數及膨脹角是最主要的影響因素(圖 2.18)。但因為連續體分析無法模擬斷層錯動引致的土壤大變形，亦無法模擬生長斷層，故近年來改用離散元素法數值模擬。翁培軒（2016）探討平移斷層引致凝聚性覆土層之變形行為，使用高嶺土與水混合作為砂箱試驗中的黏土層，利用離散元素法 PFC<sup>3D</sup> 校核試驗結果並討論覆土深度、錯移量對地表變形的影響。Li et al. (2019) 進行無凝聚力砂土之逆斷層砂箱試驗，利用離散元素法 PFC<sup>3D</sup> 校核試驗結果並測定數值模擬之微觀參數，作為研究斷層與橋樑基礎互制的基本要素(圖 2.19)。

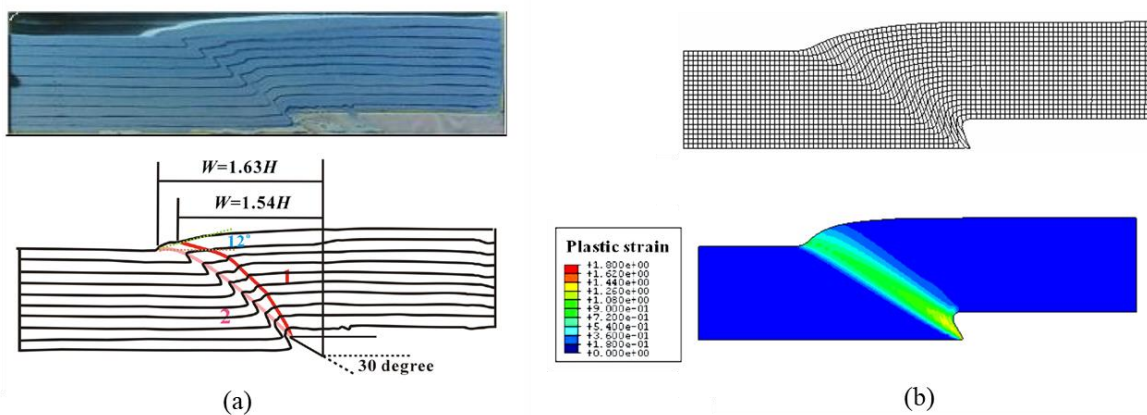


圖 2.18 逆斷層砂箱試驗與 ABAQUS2D 數值分析模擬(a)砂箱試驗照片及描繪圖  
(b)數值分析之網格變形及與塑性應變帶(鍾春富, 2007)

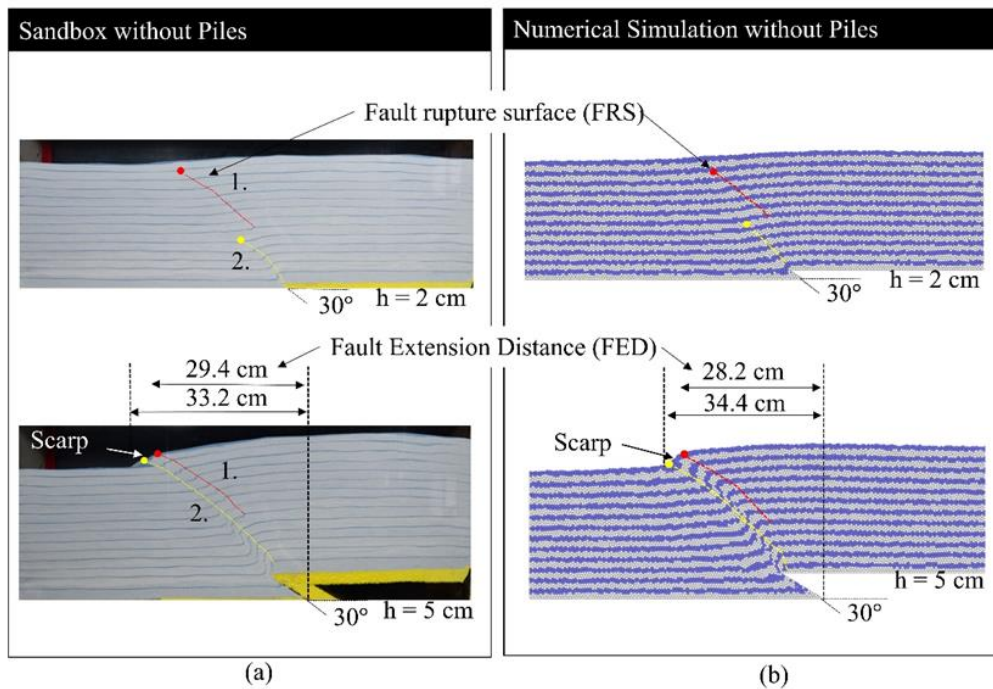


圖 2.19 逆斷層砂箱試驗與 PFC3D 數值分析模擬(a)砂箱試驗(b)數值分析 (Li et al., 2019)

Garcia & Bray (2018) 利用離散元素法 PFC<sup>3D</sup> 探討顆粒材料在直剪試驗中，以及斷層錯動所產生的剪裂行為。其研究將土壤製作成非球形的顆粒集合(圖 2.20)，成功模擬出在直剪試驗中使用不同孔隙率土壤的壓縮與剪脹行為；在砂箱尺度數值分析試驗中，藉由觀察土壤顆粒旋轉、摩擦消散、剪應變、體積應變與接觸力可清楚的展現出斷層在覆土層中的剪裂帶(圖 2.21)。

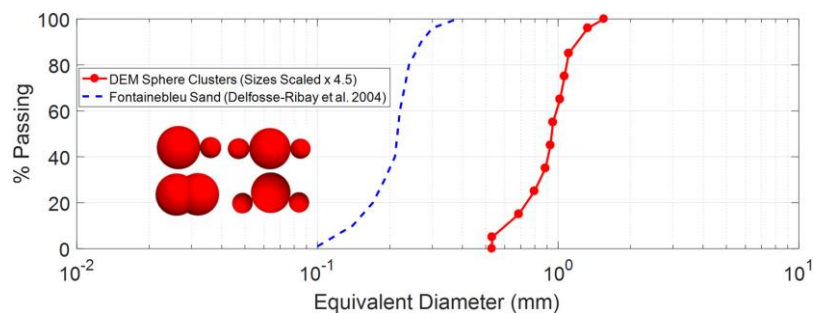


圖 2.20 數值分析中的土壤顆粒形狀與粒徑分布 (Garcia & Bray, 2018)

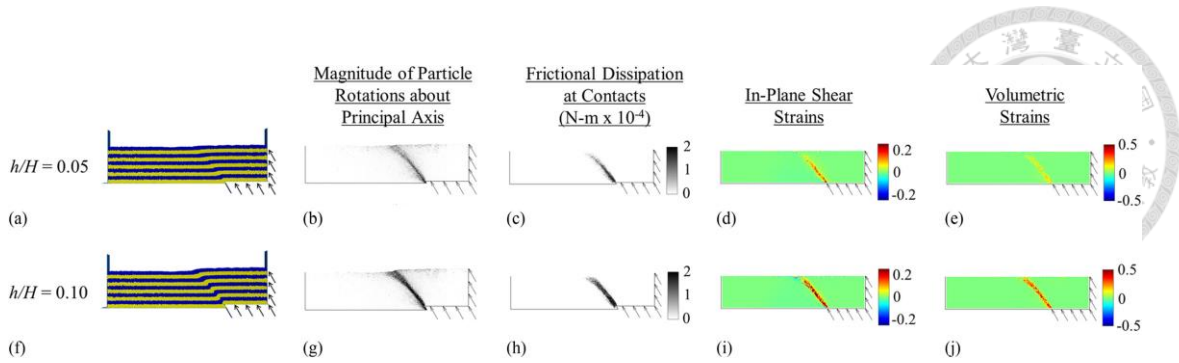


圖 2.21 覆土層剪裂帶的發展情形 (Garcia & Bray, 2018)

上述研究均將覆土層假設為單一種地層來討論斷層引致之上覆土層變形。Mortazavi Zanjani & Soroush (2019) 利用有限元素法探討地表變形與斷層破裂跡在分層的不同緊密度之砂土層中的發展情形，土層模型由緊砂、中等緊砂和鬆砂以不同厚度和與排列順序交疊而成 (圖 2.22)。結果顯示在逆斷層推動的緊砂時，斷層跡在地表的位置較遠、土層中的變形區域較集中，鬆砂反之，而其他排列的地層變形結果則介於鬆砂與緊砂之間。

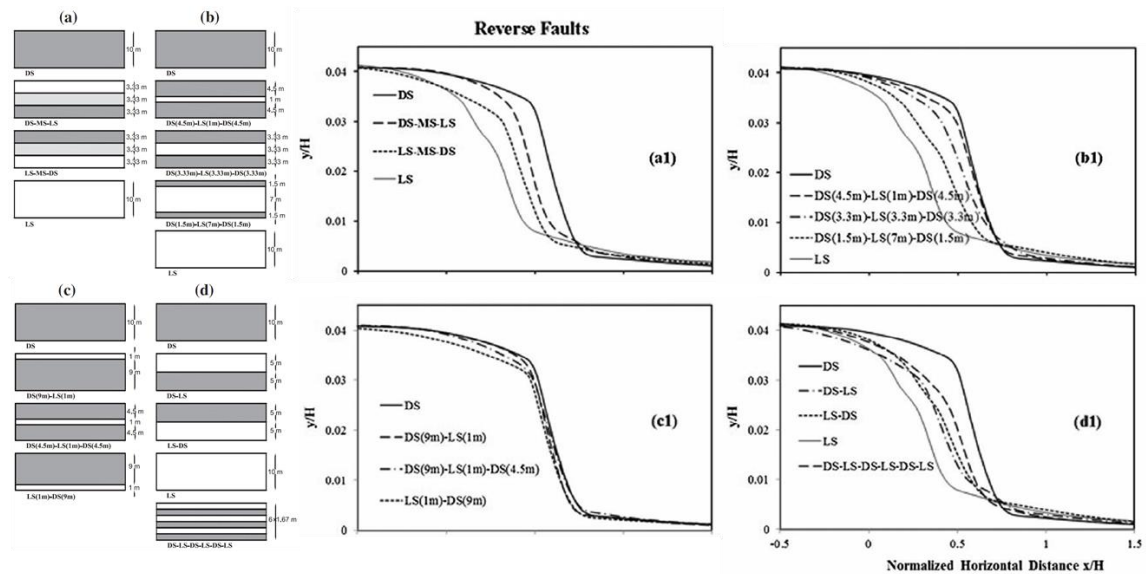


圖 2.22 不同緊密度之分層砂土層的地表變形 (Mortazavi Zanjani & Soroush, 2019)





## 2.1.5 槽溝案例數值分析

使用離散元素法建立土層斷層錯動的數值模型有以下幾項優點：斷層錯動使得土壤大變形時仍可持續運算，由顆粒元素組成的地層可以分離，地層受力後，發生地層倒轉、變厚或變薄的現象可以真實呈現。Yang et al. (2014) 利用二維離散元素法 (PFC<sup>2D</sup>) 探討霧峰槽溝在地表附近形成之同震斷層擴展褶皺 (圖 2.23)。首先透過數值方法建立雙軸試驗與直接剪力試驗來校正離散元素法中的微觀參數，並討論顆粒鍵結模型與鍵結強度的適用性。研究成果將土層模型設定為顆粒接觸鍵結模型 (contact bond model)，成功模擬出霧峰槽溝由盲斷層錯動造成的斷層擴展褶皺構造，地層厚度變化、複雜的斷層破裂跡發展順序與褶皺前翼地層倒轉等變形特徵 (圖 2.24)。

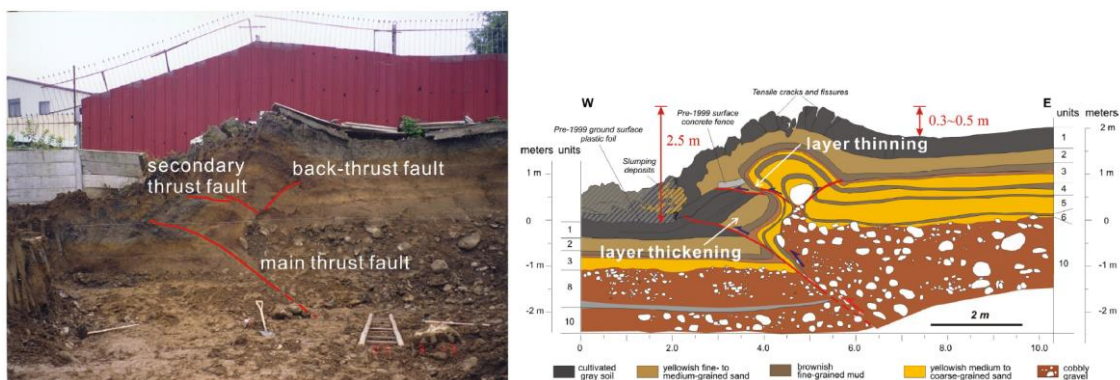


圖 2.23 霧峰槽溝剖面與斷層破裂跡發展位置 (Yang et al., 2014)

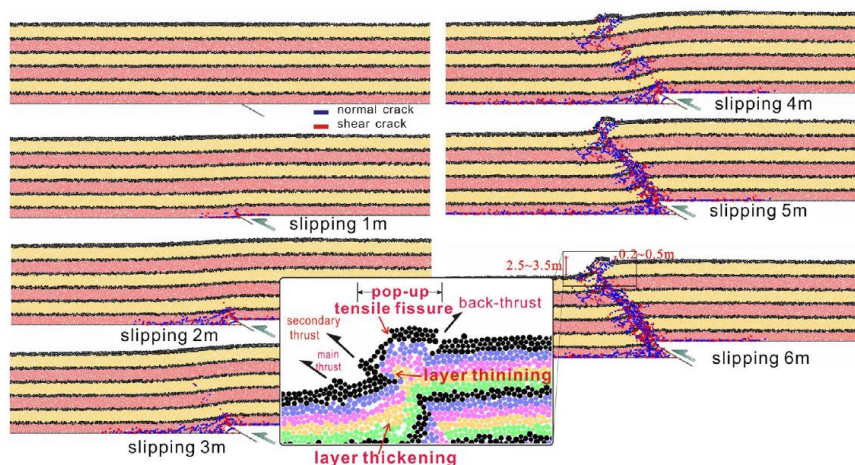


圖 2.24 霧峰槽溝受盲斷層錯動之數值模型 (Yang et al., 2014)

徐家祥 (2016) 亦利用二維離散元素法 (PFC<sup>2D</sup>) 討論竹山槽溝南北牆在構造上的差異。數值分析模型之地層依照現地土樣的力學性質分為上層黏土層與下層礫石層，由圓形鋼體顆粒與不同鍵結模型組成。研究成果將斷層假設為一次性錯動，發現當主斷層傾角為 24 度時，礫石層主要受到側向應力擠壓，使得黏土層之向斜軸受到截切，類似於北牆之構造演育；當主斷層傾角為 32 度時，礫石層傾向向上推擠，黏土層之破裂方向傾向垂直方向，則類似於南牆的構造特徵 (圖 2.25，虛線為斷層演育可能發展的趨勢)。

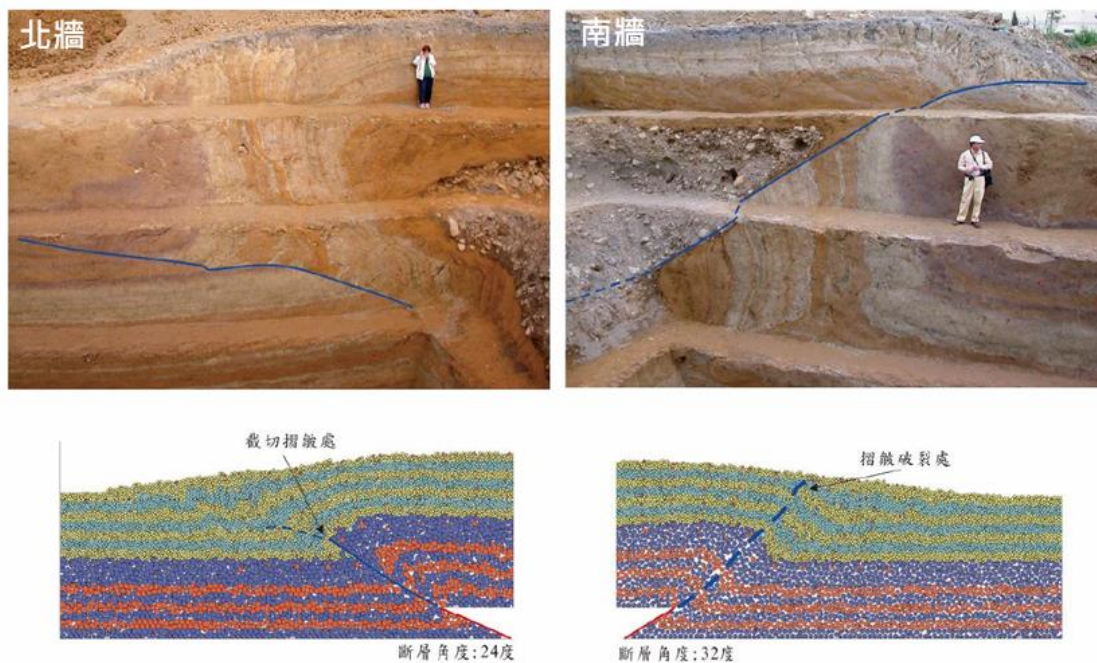


圖 2.25 數值分析模擬竹山槽溝南北牆之構造差異 (徐家祥, 2016)

上述槽溝案例在數值分析中建置土層時，都先透過 PFC 進行力學試驗模擬，基於現地土層力學性質轉換成離散元素法數值分析中合理的微觀參數。兩研究之土層均由單一圓形顆粒組成，土層變形的結果都是由指準層與模型推動過程決定，尚未考慮礫石層之組構特性。且竹山槽溝的模擬是假設斷層一次性錯動後的變形趨勢，但實際上竹山槽溝紀錄共 5 次地震事件，值得進一步分階段探討。



## 2.2 礫石層之組構分類與工程特性

台灣西部的卵礫石層主要分布於西北部與中部之台地及麓山帶丘陵地，礫石顆粒形狀呈橢球狀至微扁平狀 (Woo et al., 1982; 褚炳麟, 1982)。透過水流搬運沉積的礫石長軸有接近水平的特性，而礫石之間有時候可能會以低角度互相重疊形成覆瓦狀構造。褚炳麟 (1996) 認為卵礫石堆積層具有複雜的材料組成、地層組構與顆粒排列方向性，使得大地工程性質與行為有異於沖積土層與岩層。在台中八卦山區與林口台地附近，常見超過 30、40m 的自然高陡邊坡且其坡角維持高過 70° 以上 (蔡明欣等人, 1995)，顯示礫石材料在垂直於沉積方向上的剪力強度較高，比現地直剪試驗所求得知水平面剪力強度大，此現象即與礫石材料具有異向性有關。

礫石層特殊的工程性質可藉由現地調查加以探討，王文祥 (1999) 提出礫石邊坡的穩定性與礫石排列方式有關，礫石層的剪力強度與礫石淨間距有相當密切的關係；Chang & Cheng (2014) 利用現地卵礫石層之坡度與坡高評估其剪力強度，並由野外量測之基質強度、拍攝現地礫石層照片進行影像分析取得之礫石含量與粒徑分布等地質特性進行迴歸分析，建立卵礫石層之組成與強度關係。

卵礫石層的強度亦可透過現地或室內試驗來評估，Lin et al. (1998) 利用現地平鈹載重試驗求取礫石層的地基反力；Lin et al. (2000) 透過物理試驗求取礫石層的剪力模數與剪應變的關係；Chu et al. (2010) 利用排水三軸試驗探討在純剪力下的礫質土壤變形行為；Chang et al. (2015) 利用震波波速取得彈性力學相關參數，並從礫石層之坡度與坡高反算地層之剪力強度。

國內對於卵礫石層的探勘、調查、試驗、分類與分析方法至今仍無標準規範可循，過去文獻多以不同方式探討卵礫石層的工程特性，彙整影響礫石層之強度及變形性的因素包含：礫石粒徑大小、形狀及排列因素、礫石與基質含量、基質成份與基質物理性質等，本研究選擇礫石之形狀及排列因素與礫石體積含量作為礫石層組構特性的變因。





### 2.3 礫石層之顆粒力學模擬與應用

以往在數值分析中模擬砂土層時，由於砂土顆粒大小遠小於研究問題的尺寸，可將土壤假設為連續體材料，但是礫石層的組成包含橢球狀的礫石以及尺寸相對小的基質材料，而且礫石顆粒之間有明顯互相分離的特性，故在模擬礫石材料時，利用顆粒元素法是一個更貼近材料性質的分析方法。

陳修 (1995) 透過不連續變形分析法 (DDA) 探討在卵礫石層內進行深開挖與隧道開挖之行為，其研究利用形狀類似於圓形或橢球形的多邊形塊體來模擬礫石顆粒，探討水平或垂直沉積排列的礫石的坡面穩定性，發現水平沉積排列的礫石層在開挖解壓前的側向應力較小，開挖後的坡面穩定性亦較佳，變位量較小 (圖 2.26)。Chang et al. (2003) 利用離散元素法發展出複合圓形顆粒模式 (Multi-Circle Granule Model, MCGM) 探討二維不規則形狀卵礫石堆積層之力學分析，透過自由落體試驗、落門試驗與室內直剪試驗探討顆粒形狀對力學行為的影響。研究結果顯示，顆粒形狀確實會影響卵礫石堆積體安息角之大小；而顆粒互鎖、排列之異向性、顆粒間之接觸點數，亦是影響隧道開挖穩定性及抗剪強度之關鍵因素 (圖 2.27、圖 2.28)。張光宗等人 (2014) 利用 PFC<sup>2D</sup> 探討卵礫石的力學行為，首先進行雙軸試驗校正微觀參數，再進行複迴歸分析建立宏觀參數與微觀參數的關係，以確認參數的合理性。其研究結果顯示當卵礫石粒徑越大與含量越多，其剪力強度、彈性模數、柏松比、摩擦角也會越大，但凝聚力略為下降 (圖 2.29)。

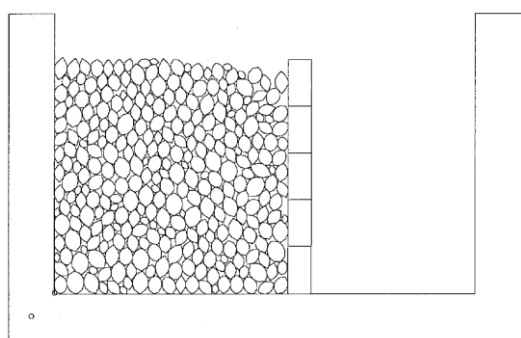


圖3. 垂直沈積排列之深開挖擋土設施

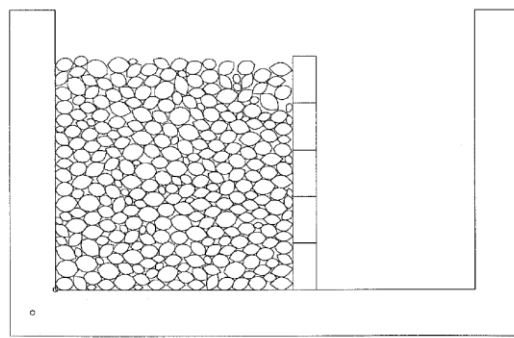


圖4. 水平沈積排列之深開挖擋土設施

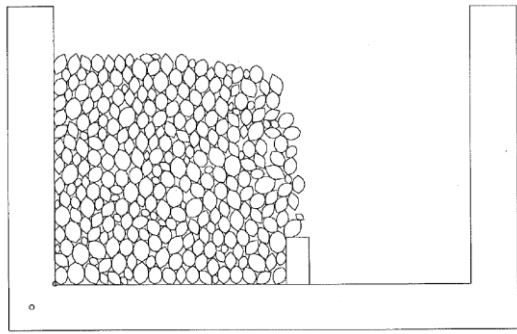


圖7. 2000週期後，垂直沈積排列深開挖斷面之變形

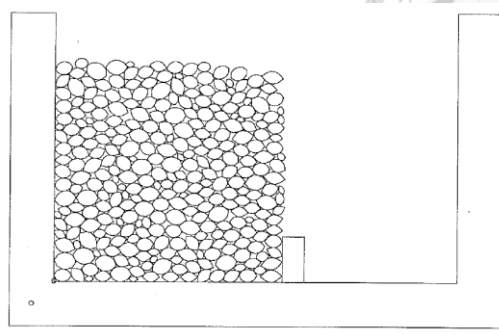


圖8. 2000週期後，水平沈積排列深開挖斷面之變形

圖 2. 26 垂直與水平沉積排列之礫石層開挖結果 (陳修, 1995)

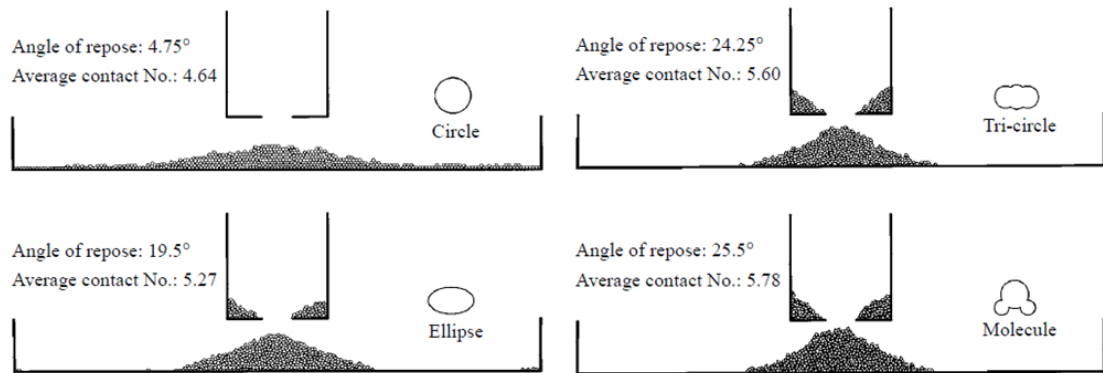


圖 2. 27 不同顆粒形狀之自由落體試驗 (Chang et al., 2003)

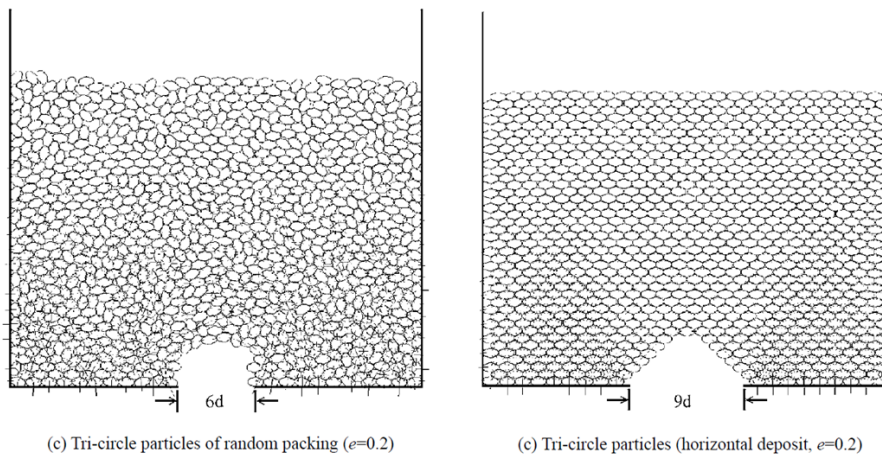


圖 2. 28 不規則排列與水平排列之三合圓顆粒落門試驗 (Chang et al., 2003)

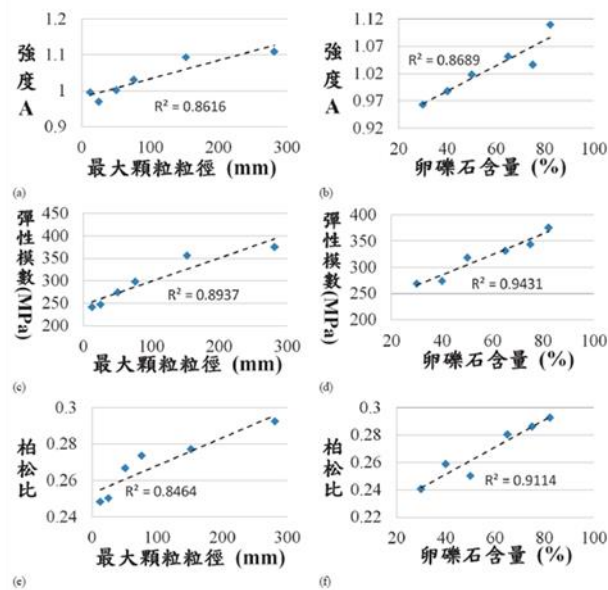
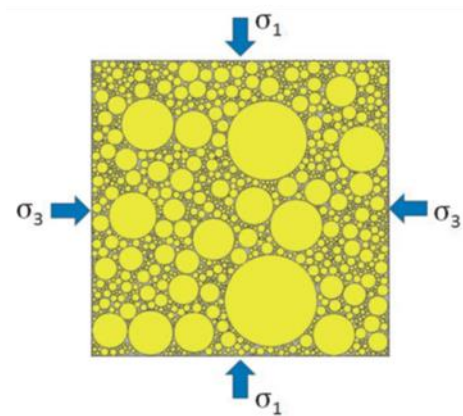


圖 2. 29 PFC<sup>2D</sup> 雙軸試驗模型示意圖與模擬結果 (張光宗等人, 2014)

## 2.4 綜合討論

過去文獻探討斷層錯動引致的地表變形研究採用的方法學可包含現地調查、物理砂箱試驗與數值分析。現地案例可觀察到地層經常為非均質，且有堆積礫石層的存在，但少有研究量化礫石變形形貌且無研究將其與斷層抬升量做連結；亦尚未有研究透過砂箱試驗與數值分析探討礫石層多變的組構特性與斷層作用的關係。

Avar & Hudyma (2019) 提出了幾項從工程地質的觀點討論地表破裂跡的未來發展趨勢：有限元素法結合離散元素法可以更深入的討論斷層跡由岩盤發展，經過上覆土層而破裂至地表的過程；在室內試驗經常只使用單一的土層性質，無法反映不均質地層的變形特性。

本研究擬結合上述之可發展性，透過物理砂箱試驗與離散元素法數值分析探討含有礫石層之複合地層受逆斷層作用的變形行為，並模擬經歷多次斷層活動之竹山槽溝的變形演育。



## 第 3 章 研究方法

本研究之方法學包含 3 個部份：透過現地調查與影像辨識方法取得礫石層之組構特性並量化礫石旋轉角度；透過物理砂箱試驗進行基本行為的觀察與初步定量分析，其結果亦作為後續數值分析的微觀參數校核基準；透過數值分析(PFC<sup>3D</sup>)進行參數敏感度分析，以探討礫石層的組構變異與複合地層變形的關聯性。本章節將詳述研究中所使用的方法及其理論。

### 3.1 現地調查與影像辨識

本研究將現地調查之拍攝照片結合 Fiji 影像自動辨識軟體取得礫石層中的礫石尺寸、粒形、粒徑分布以及礫石在礫石層中的含量比；結合 ArcGIS 數化影像功能來量化礫石的旋轉角度。

本研究前往新城斷層附近的頭前溪河床採集礫石以作為物理砂箱試驗中的材料。利用孔徑 4 cm 與 1 cm 之現地篩當作上下界線篩選適合的粒徑 (圖 3.1)，回到實驗室後，將採集的礫石以不同的方向插入細砂中，可分別得到礫石的長軸(a)、中間軸(b)和短軸(c)。將深色的礫石放入白色的砂中是為了使顏色產生對比，才能便於電腦自動判釋。在盆中放入比例尺，再從上方拍攝照片，匯入 Fiji 影像自動辨識軟體來統計頭前溪河床礫石的基本材料性質，包括長徑比與粒徑分布，成果詳見 3.2.2 節。其判釋原理是將拍攝照片轉換為灰階照片，由人工方式選取色調屏障，將照片中不同的物質區分出來 (圖 3.2)。竹山槽溝的礫石組構特性之測定亦同樣結合現地調查與影像辨識方法，成果詳見 4.1.3 節。

ArcGIS 數化礫石旋轉角度的功能應用於新城斷層槽溝開挖剖面、三義斷層露頭剖面以及竹山槽溝剝片標本。將拍攝照片匯入 ArcGIS 中，接著將礫石長軸數化成線段，利用「COGO (Coordinate geometry)」工具箱計算線段的方位來得到礫石長軸的方向，成果詳見 4.1 節。此功能亦應用於分析複合地層砂箱試驗中的礫石旋轉角度。





圖 3.1 砂箱礫石之採集過程（現地篩分析）



圖 3.2 利用影像自動辨識軟體測定礫石之基本材料性質





## 3.2 物理砂箱試驗

### 3.2.1 砂箱設備

本研究進行 1g 的物理砂箱試驗，砂箱長 110 cm × 寬 20 cm × 高 60 cm，斷層尖端位置距離上盤邊界 35 cm，地層厚度(H)視鋪設情況而定，本研究均鋪設 20cm 厚之地層，此地層厚度縮尺約為現地尺寸的 1/100，砂箱試驗配置圖如圖 3.3。砂箱底板分成上盤與下盤兩個部分，下盤固定於底座，上盤與驅動馬達連接，以穩定速度推動上盤以模擬斷層錯動，本研究之砂箱試驗為模擬一 30° 逆斷層，驅動馬達以  $2.8 \times 10^{-4}$  m/s 的速度向上推動，總共垂直抬升量( $\Delta H$ )為 5 cm，基盤抬升比( $\Delta H/H$ )最大至 0.25。進行試驗時，會在砂箱側面擺設一攝影機，用來拍攝側視之地層變形樣貌與斷層破裂跡發展，觀察推動過程中的破裂跡發展位置與順序。另外為了更精確的掌握三維之地表變形，本研究亦使用空拍技術，在砂箱正上方擺設控制點座標，搭配 Nikon D700 單眼數位相機，從上拍攝每個階段的地表變形重疊影像之後再匯入 Agisoft Photoscan 影像分析軟體，建置三維的數值地形模型(DTM, Digital Terrain Model)，其精度達 0.3 mm，最後用 ArcGIS 軟體進行分析與展示(圖 3.4)。



圖 3.3 砂箱試驗配置圖 (鍾春富，2007)

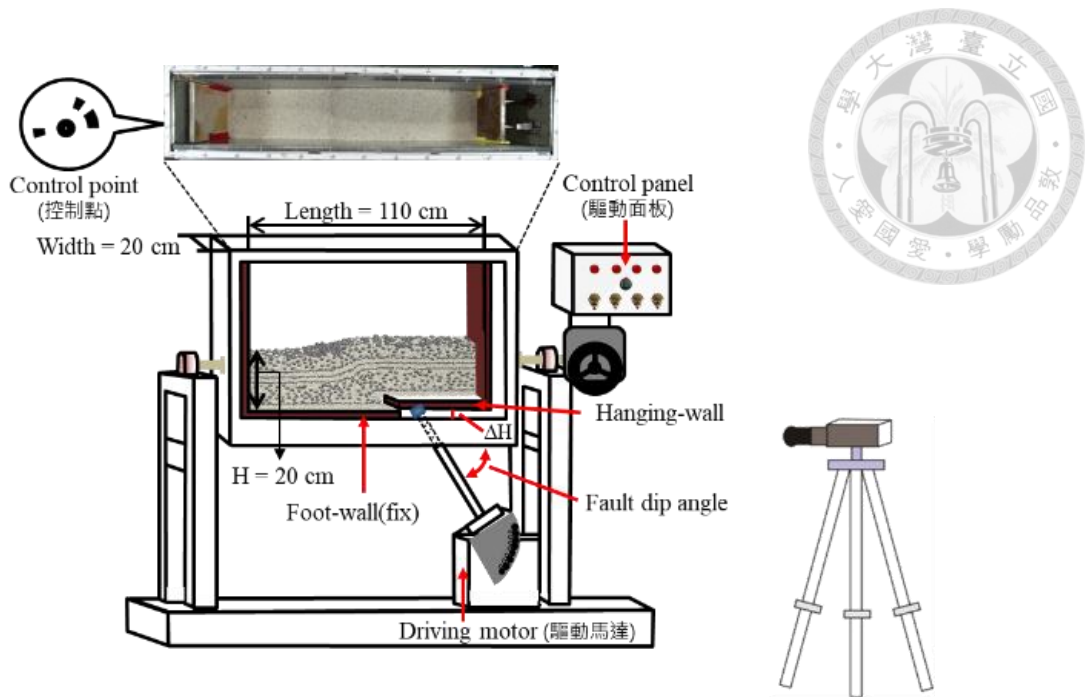


圖 3.4 砂箱試驗配置示意與說明圖 (修改自 Li et al., 2019)

### 3.2.2 砂箱試驗材料與性質測定

本研究的砂箱試驗包含單一砂層砂箱試驗以及複合地層砂箱試驗。單一砂層砂箱試驗選用標準石英砂作為材料，其基本物理性質如表 3.1。複合地層砂箱試驗參考新城斷層篤行營區 1 號槽溝剖面，初步假設為礫石層與砂層的互層，此砂箱試驗中使用了兩種顆粒材料，分別是取自新城斷層附近的頭前溪河床礫石與標準石英砂。由於一般描述礫石層的組成時，將肉眼明顯可見的礫石稱作礫石顆粒，其餘部分稱為基質。因此在複合地層砂箱試驗中，礫石層的礫石顆粒使用河床礫石作為材料，礫石層內的基質與砂層使用標準石英砂作為材料，本研究暫不考慮基質的凝聚力。

礫石之基本材料性質透過 Fiji 影像自動辨識軟體分析所得之長徑比與粒徑分布曲線如圖 3.5、圖 3.6、表 3.2 所示，平均長徑比為 1.73，且其粒徑分布曲線與篤行營區 1 號槽溝礫石之粒徑分布曲線趨勢大致相同。

表 3.1 標準石英砂之基本物理性質 (修改自賴兆偉, 2018)

項目	標準石英砂
比重 $G_s$	2.65
均勻係數 $C_u$	1.64
曲率係數 $C_c$	1.01
平均粒徑 $D_{50}$ (mm)	0.98
最大乾單位重 $\gamma_{d,max}$ (kN/m <sup>3</sup> )	16.26
最小乾單位重 $\gamma_{d,min}$ (kN/m <sup>3</sup> )	13.45
統一土壤分類 USCS	SP

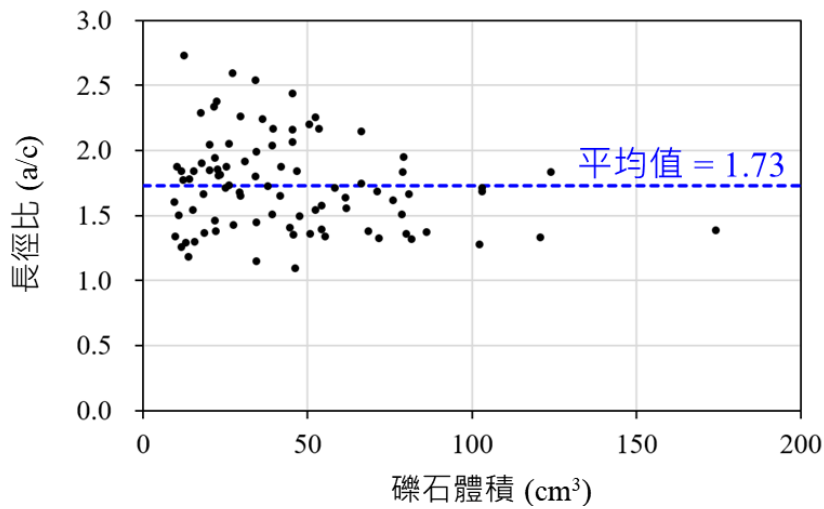


圖 3.5 砂箱礫石之長徑比

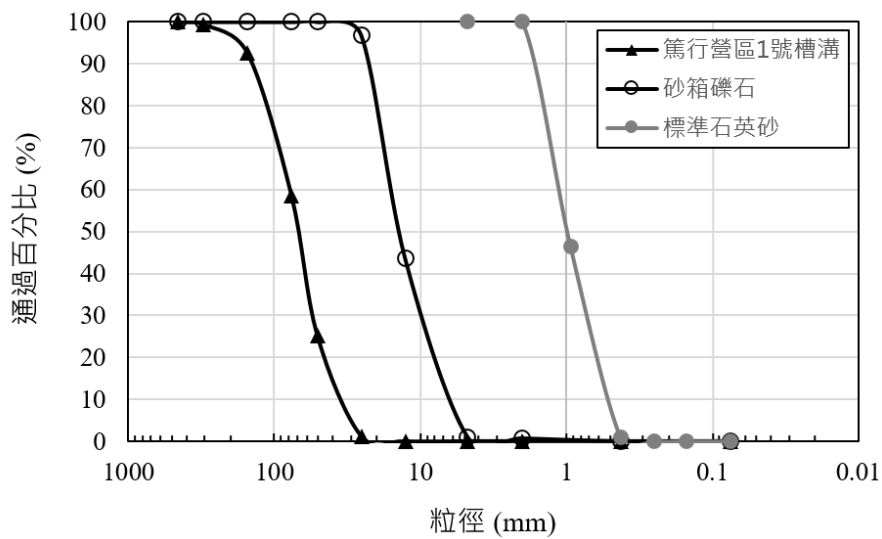


圖 3.6 砂箱顆粒材料之粒徑分布曲線

表 3.2 砂箱礫石與篤行營區礫石之長徑比比較

	長徑比 (a/c)	粒徑分布	統計數量
篤行營區 1號槽溝	1.64	ArcGIS+ Fiji影像判釋	162
砂箱礫石 (頭前溪河床)	1.73	篩分析+ Fiji影像判釋	289



### 3.2.3 砂箱試驗方法與過程

砂箱試驗的過程分為前置作業與斷層推動過程。前置作業包含在砂箱角落貼上握把布、染色砂準備以及礫石標籤製作。黏貼握把布地目的是防止漏砂，而染色砂的目的是為了協助觀察試驗中的斷層滑動面發展過程，因此當每層砂層鋪設 2cm 時，即在觀察面（砂箱側面）鋪設一條黑色色砂，以模擬沉積物成層堆積的構造，此色砂僅顏色不同，材料性質均與試驗砂相同。由於礫石顆粒在砂箱內會被標準石英砂覆蓋，故在每一顆礫石上利用保麗龍膠貼上標籤紙，並畫上箭頭指示礫石原始沉積角度（圖 3.7）。觀察面上可見 5 層礫石層與 4 層色砂，後續分析將透過礫石的旋轉、色砂的斷裂判釋斷層的發育情況。

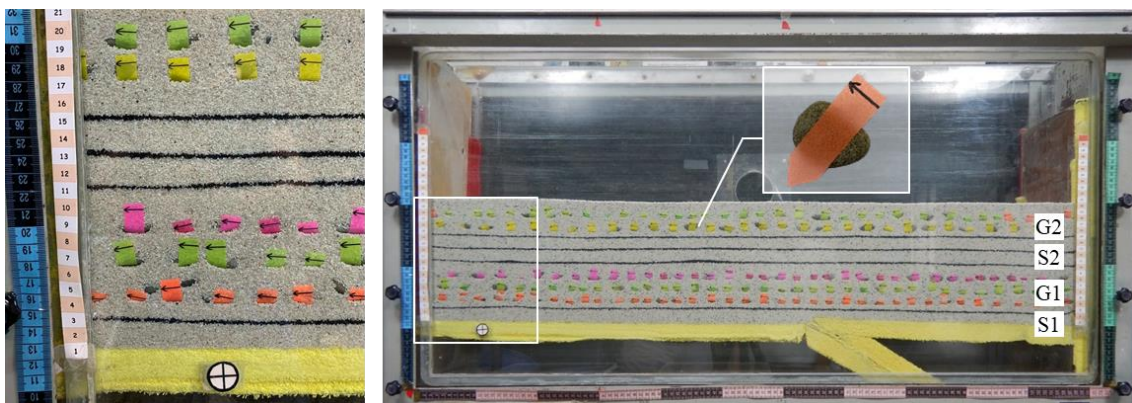


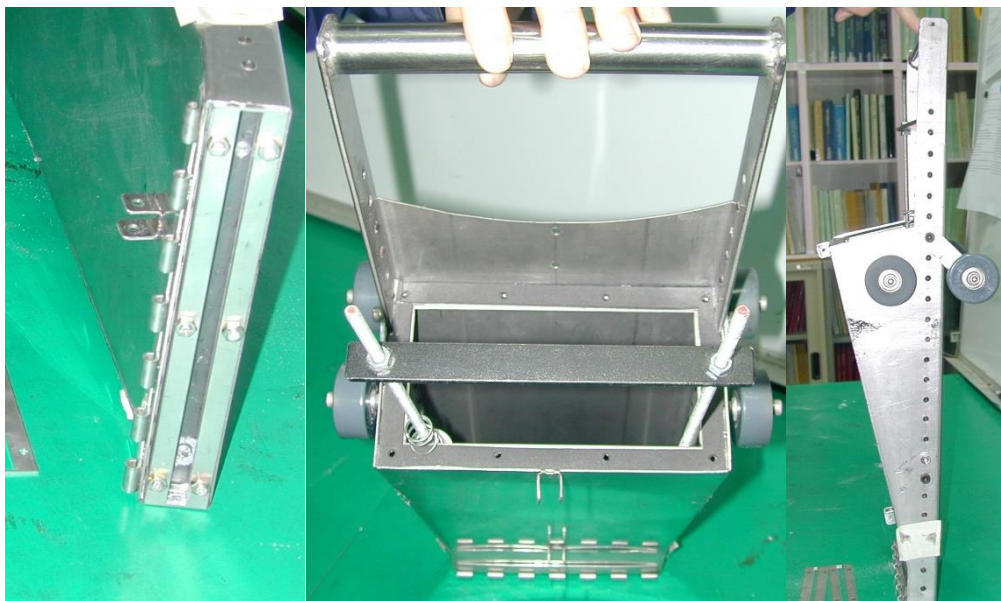
圖 3.7 色砂與標籤礫石鋪設情形

砂層鋪設的方式係用實降器自一定高度實降砂顆粒，實降器跨坐在砂箱上方，可以在砂箱長度方向來回擺動（圖 3.8）。實降開口的大小和實降器移動速度會影



響試驗砂的相對密度，本試驗的實降器開口 0.8cm、移動速度約 5cm/s 與落距 14cm，由圖 3.9 的關係式得相對密度為 80%，屬於緊砂。反算此試驗砂的乾單位重為 15.6kN/m<sup>3</sup>，砂層孔隙率約 0.4。

礫石層鋪設的方式是透過雙手擺放礫石，以及實降器填充基質。首先先用實降器鋪上一層薄薄的基質，接著將礫石一顆一顆放到基質中，確保礫石下方不會有縫隙。在放置礫石時，統一將其長軸方向朝向砂箱長度方向，短軸則平行於砂箱高度方向。最靠近觀察面的礫石有另外貼上標籤紙，且放置這些礫石的時候，要將標籤紙服貼於壓克力牆面，避免被之後鋪上的砂顆粒遮住。平鋪完一層礫石之後，再利用實降器鋪上一層薄薄的基質，循環以上步驟，直到鋪滿礫石層所需的高度（圖 3.10）。



(a)落距調整裝置

(b)實降器俯視圖

(c)底部開口控制

圖 3.8 砂土實降設備（李健宏，2019）



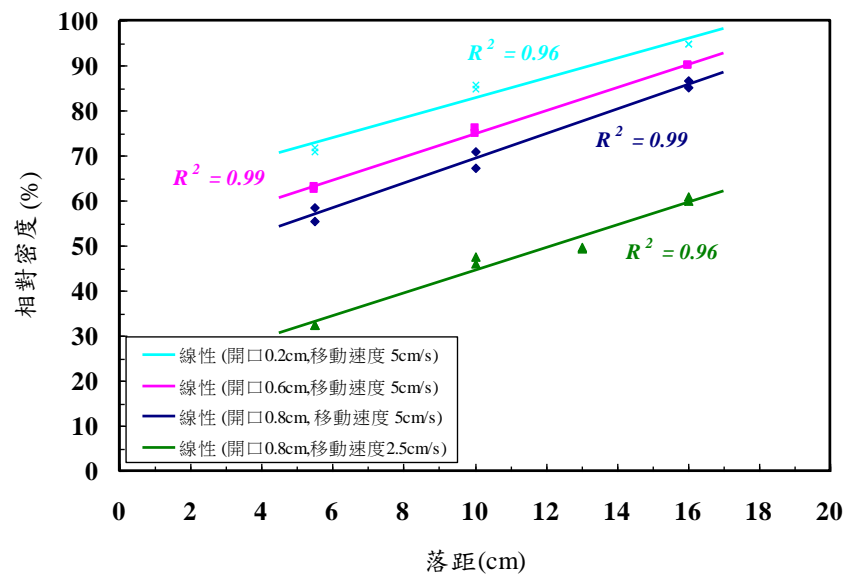


圖 3.9 砂土震降器開口及震降高度之率定試驗結果 (林銘郎等人, 2004)



圖 3.10 砂箱試驗準備過程

### 3.3 數值分析

#### 3.3.1 數值分析方法簡介

本研究使用 PFC<sup>3D</sup>5.00 版 (Particle Flow Code in 3 Dimensions) 作為數值模擬的分析工具。此軟體的演算法為離散元素法 (Distinct Element Method, DEM), 以顆粒為基本單元, 計算大量的顆粒在特定的邊界條件之下的運動以及交互作用。

相較於一般常用的有限元素法, 離散元素法的優勢在於能夠表現材料受力後

的變形不連續，且可以承受大位移。大地工程領域中的材料由土壤與岩石組成，其材料結構皆為顆粒堆疊或膠結而成，故利用離散元素法可模擬土壤與岩石受力後產生的微裂隙、破裂面（滑動面）以及材料受力後的破壞力學行為。



### (1) 基本假設

在使用 PFC<sup>3D</sup> 前，必需先了解原理以及以下之基本假設：

- I. 每個顆粒元素皆為占有空間及具質量之剛性球體。
- II. 全部的顆粒皆為球狀，即球顆粒 (balls)；但可用球團 (clumps) 指令連結球顆粒來創造出任意形狀。
- III. 每個顆粒元素皆可獨立移動及轉動。
- IV. 顆粒之間的作用力來自彼此接觸關係。
- V. 顆粒在接觸時之力和矩與其相對運動有關，並適用於力與位移法則。
- VI. 顆粒之間的接觸關係允許極小區域重疊 (overlap)，為點接觸。
- VII. 顆粒之間的接觸關係可加上鍵結 (bond)，其鍵結材料可因受力而引致破壞。

### (2) PFC<sup>3D</sup> 運算邏輯

PFC<sup>3D</sup>5.00 版的數值模型由物件 (bodies) 和接觸模型 (mechanical contacts) 所組成。物件包含有球顆粒、球團以及牆 (walls)，使得運動方程式可以應用於物件之間；接觸模型是控制物件之間交互作用關係，後續將詳細介紹本研究所使用的接觸模型類型。PFC<sup>3D</sup> 的運算邏輯是在每一個運算迴圈 (cycle) 內使用力與位移法則以及運動方程式，如圖 3.11。離散元素法中，顆粒接受到接觸力或力矩時，其運動行為由牛頓第二運動定律來計算，此計算結果會更新顆粒與牆的位置，以及位移後所得到的新的接觸關係。當任兩個物件之間有接觸時，將應用力與位移法則，接觸行為會依照顆粒與顆粒之間、顆粒與牆之間的組成律模式來計算新的接觸力與力矩，再一次更新顆粒所受到的外力或力矩，如此形成了一個運算迴圈。

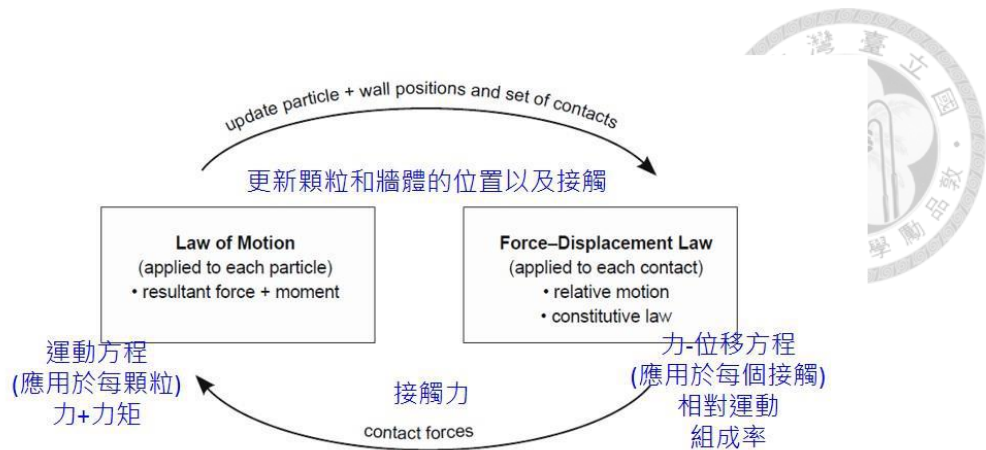


圖 3. 11 PFC<sup>3D</sup> 之運算邏輯

### (3) 微觀參數

在 PFC<sup>3D</sup> 所輸入的參數稱為微觀參數，有別於傳統的數值分析軟體所使用的巨觀參數，如楊氏模數 ( $E$ )、柏松比 ( $\nu$ )、凝聚力 ( $c$ ) 以及摩擦角 ( $\phi$ ) 等，可以藉由一般物理試驗取得的參數。PFC<sup>3D</sup> 中的微觀參數可以付與在物件上和接觸模型上，其中物件包含了顆粒元素的參數、邊界條件的參數 (牆的參數)：

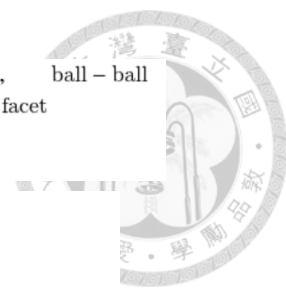
#### I. 球顆粒

在 PFC<sup>3D</sup> 中，球顆粒被假設為剛體，顆粒元素之間的接觸行為是點接觸，但接觸時的力與變形關係實際上是由顆粒質心以及彈簧 (或彈性梁) 系統來計算。此彈簧具有勁度與長度，在線性接觸模型中，意即球顆粒具有正向勁度 (normal stiffness,  $k_n^{(1)}$  或  $k_n^{(2)}$ )、切向勁度 (shear stiffness,  $k_s^{(1)}$  或  $k_s^{(2)}$ )，而球顆粒半徑即為彈簧的長度。

由球顆粒組合成的物體受到外力而產生小應變變形時，可將其視為一等向性的彈性梁。彈性梁的變形特性可以藉由楊氏模數 ( $E$ ) 與柏松比 ( $\nu$ ) 來表示，而在 PFC<sup>3D</sup> 中則利用有效模數 (effective modulus,  $E^*$ ) 與勁度比 (normal-to-shear stiffness ratio,  $\kappa^* \equiv k_n/k_s$ ) 來決定物體的可變形性，公式如下：

$$k_n := AE^*/L, \quad k_s := k_n/\kappa^* \quad (\text{式 3.1})$$

其中  $A$  為斷面積， $L$  為彈性梁長度 (圖 3. 12)，詳細公式如下：



with  $A = \begin{cases} 2rt, & 2D (t = 1) \\ \pi r^2, & 3D \end{cases}, r = \begin{cases} \min(R^{(1)}, R^{(2)}), & \text{ball - ball} \\ R^{(1)}, & \text{ball - facet} \end{cases}$

$L = \begin{cases} R^{(1)} + R^{(2)}, & \text{ball - ball} \\ R^{(1)}, & \text{ball - facet.} \end{cases}$

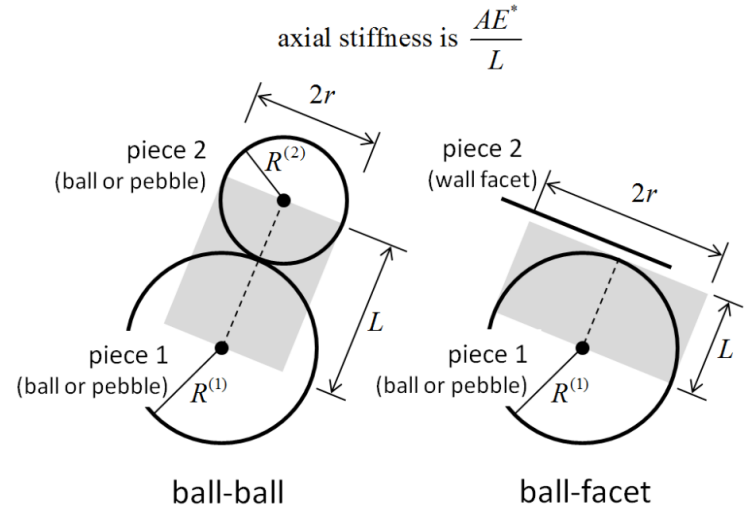


圖 3.12 比照彈性梁之變形特性示意圖

此公式意味著若要得到相同的變形性（即希望  $E^*$  相同），選用之顆粒半徑與大，正向勁度與切向勁度與大，故在設定微觀參數上必須選擇合理的參數範圍。此外，球顆粒彼此接觸時的接觸勁度（ $k_n$ 、 $k_s$ ）遵守等效的彈簧串聯勁度，故接觸勁度和彼此接觸的兩顆球顆粒半徑又有關（圖 3.13）。而顆粒之間的摩擦特性可以透過給予摩擦係數（ $\mu$ ），控制球顆粒之間是否可以相對滑動。

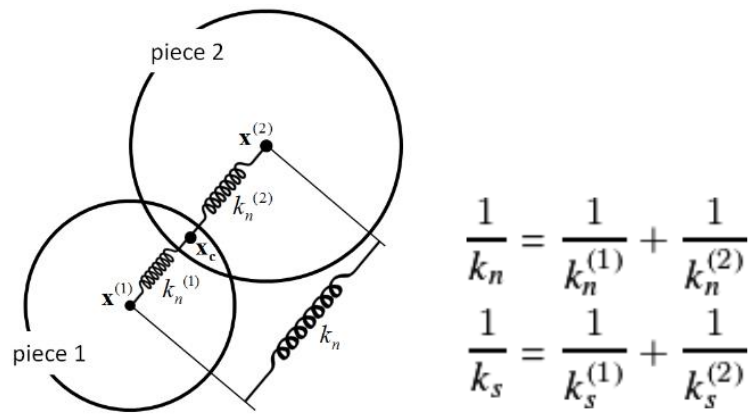


圖 3.13 顆粒勁度與接觸勁度之關係

II. 球團

此物件可以模擬任意形狀的剛體。球團是由多顆剛體顆粒（pebble）彼





此重疊、排列形成，球團在外力作用下，不會使內部變形或破裂，只會造成位移與旋轉，其參數使用與球顆粒相同。

### III. 牆

做為邊界條件的牆元素可以模擬試體受壓的情況，或是限制顆粒元素位移與變形的範圍。牆的微觀參數如同顆粒元素一樣，可以給予正向勁度、切向勁度與摩擦係數，當牆與顆粒元素接觸時，也會轉換成接觸模型微觀參數。在模擬試體受壓時，由於無法直接在牆上施予力量，因此給予牆速度以代替模擬不同應力路徑的狀況。

#### (4) 接觸模型

接觸模型控制力與位移法則，本研究中提及的接觸模型種類分述如下：

##### I. 線性接觸模型 (linear contact model)

線性接觸模型提供了線彈性的接觸行為以及摩擦行為，球顆粒的正向勁度與切向勁度為定值，如同線性彈簧提供線性的接觸力，且模型不可承受張力。本研究中使用此模型來模擬不具凝聚力的砂土與強調顆粒特性的礫石層，給定的參數包括  $k_n$ 、 $k_s$  與  $\mu$ 。

##### II. 接觸鍵結模型 (contact bond model)

接觸鍵結模型等同於線性接觸模型加上點接觸的鍵結，此鍵結能夠傳遞力，可用來模擬材料的膠結行為。加上鍵結之後可以承受張力，直到超過設定的鍵結強度之後，鍵結會斷裂，回到線性接觸模型的受力與變形行為。在本研究中，尚未使用到此接觸模型。

##### III. 平行鍵結模型 (parallel bond model)

平行鍵結模型與接觸鍵結模型同樣屬於有鍵結的設定，只是平行鍵結除了傳遞力之外，還可以傳遞彎矩，且接觸在一有限的面積上。常用來模擬具有膠結的材料，包括混凝土或岩石。在本研究中，尚未使用到此接觸模型。



### 3.3.2 數值分析模型與參數設定

本研究的數值分析是以砂箱模型為基礎，首先進行與物理砂箱試驗相同尺寸的小尺度數值模擬，用以率定邊界條件與微觀參數，並探討參數敏感度（詳見第 4.4 節），最後以竹山槽溝北牆為案例，進行全尺度的數值模擬（詳見第 5 章），探討竹山槽溝的演育過程。

小尺度數值模擬的配置如圖 3.14 和圖 3.15，砂箱由 14 個剛性牆組成，砂箱四周有 6 個牆面，因為其模擬物理砂箱四周的壓克力面，故假設為光滑面而沒有設定摩擦係數；砂箱底面與斷層推動面共有 8 個牆面，設定有摩擦係數=0.577。逆斷層推動的方式是設定上盤可以以固定速度沿著斷層傾角面向上移動，本研究探討之斷層錯動引致地層變形行為為一準靜態過程（quasi-static process），斷層推動速度並非主要研究變因，故在推動過程中確保系統之平均不平衡力比（unbalanced force ratio）小於 0.015 則認為設定的推動速度是合理的。

在小尺度數值模擬中的複合地層同樣分為砂層與礫石層，砂層由球顆粒組成，考量電腦最高可運算的效率，以球顆粒半徑 2.5mm 進行模擬；礫石層由具有長徑比的礫石顆粒以及基質組成，顆粒元素分別為球團與球顆粒，礫石長軸為 2.3cm，基質半徑為 2.5mm，和模擬砂層的球顆粒相同。圖 3.15 為砂層與礫石層互層的情境，球團有 93,071 個，球顆粒有 97,078 個，總顆粒數約 19 萬個。

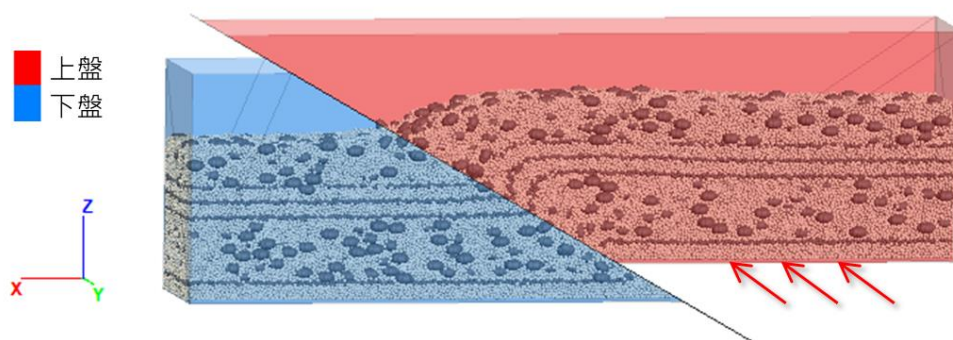


圖 3.14 砂箱數值逆斷層推動示意圖

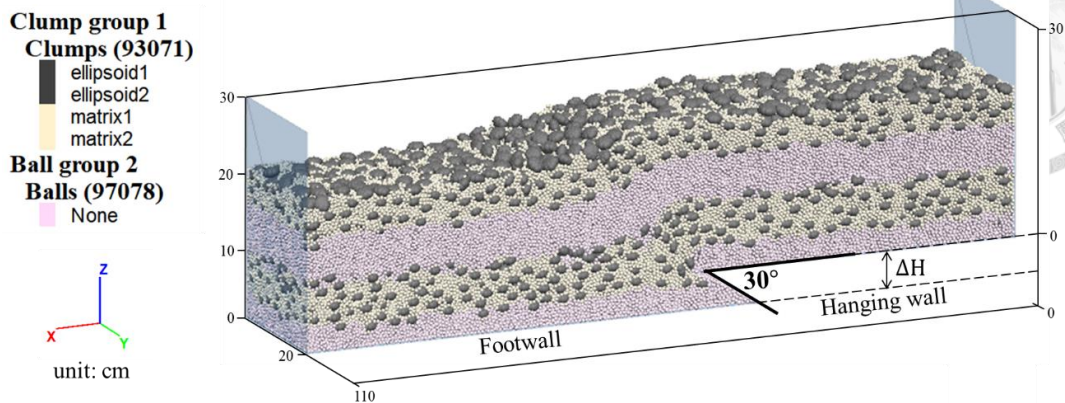


圖 3.15 小尺度砂箱數值模擬配置圖

數值模擬之中的地層生成方法是利用固定孔隙率生成。根據一般物理試驗取得標準石英砂的最大乾密度與最小乾密度，可推求物理砂箱試驗中的孔隙率 ( $n$ ) 可能在 0.37~0.48，故在模擬小尺度的數值分析中，使用孔隙率=0.4 的方法生成固定高度的地層，並設定系統之平均不平衡力比小於 0.005 後視為完成平衡。在生成地層和斷層推動的過程中，可以透過建立監測球來監測孔隙率，圖 3.16 監測了砂箱剖面  $y=10\text{cm}$  之剖面中央 (1~4 號) 以及剖面邊界 (5~8 號) 的孔隙率，監測球的半徑為 1.5cm 或 2cm。可以觀察到生成地層的孔隙率範圍在 0.32~0.42 之間，愈底層的地層其孔隙率愈低，斷層開始推動後，顆粒開始相對位移，位在砂箱中央的監測球的孔隙率開始浮動；位在邊界的監測球的孔隙率維持不變，可確認該處的地層並未受到擾動。

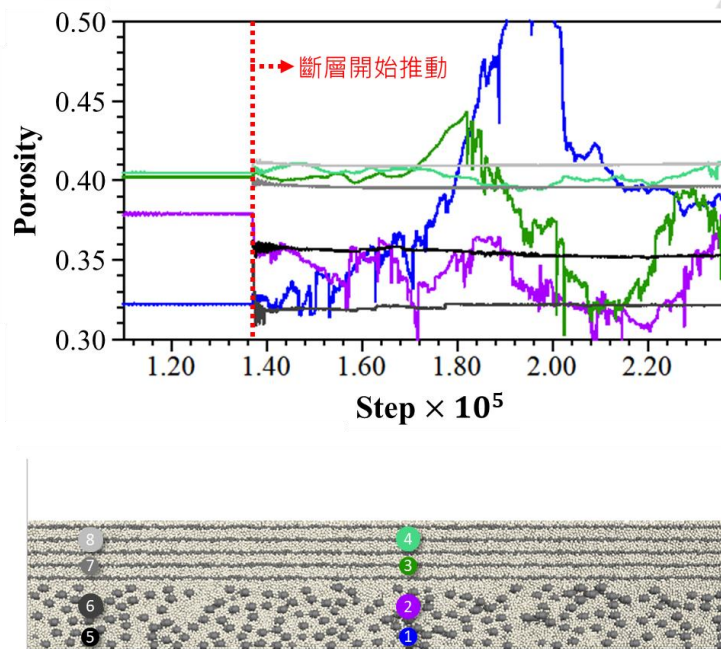
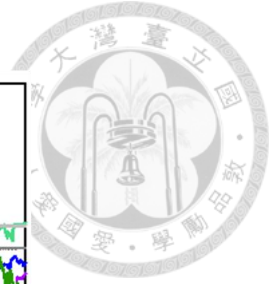


圖 3.16 砂箱內各高度的孔隙率監測

傳統數值分析軟體與工程上一般都使用巨觀參數來定義材料的特性，但在 PFC<sup>3D</sup> 當中，所使用的微觀參數必須先透過試驗模擬或現象觀察來決定合理的參數範圍。在本研究中，率定 PFC<sup>3D</sup> 微觀參數的方式為校核物理砂箱試驗所觀察到的現象是否與小尺度數值模擬的成果一致，比對項目包含斷層滑動面發展、斷層擴展距離與地表變形。由於本研究模擬具有兩種地層的情況，所以首先校核小尺度單一砂層的模擬結果是否與物理試驗一致，接著再加入礫石層來討論。

李健宏 (2019)、柳鈞元 (2019) 已針對小尺度單一砂層數值模擬進行敏感度分析，測試項目包含有球顆粒粒徑、球顆粒勁度 ( $k_n, k_s$ )、球顆粒鎖旋轉比例 (lock spin) 與摩擦係數 ( $\mu$ )。在其他參數設定都相同的情況下，球顆粒粒徑和球顆粒勁度分別都會嚴重影響地表變形的樣貌，此與 PFC<sup>3D</sup> 中的運算原理有關，球顆粒之間的變形特性可參照式 3.1；球顆粒旋轉比例影響顆粒之間的摩擦特性，主要影響斷層崖的坡角，若不鎖定旋轉，斷層崖上的球顆粒容易滾落至下盤，造成較小的安息角；摩擦係數的有無會影響是否有明顯的斷層滑動面產生，而摩擦係數的大或小較無差異。本研究參考上述研究成果，調整後之微觀參數如表 3.3。



表 3.3 小尺度砂箱之微觀參數

地層		Void ratio	Particle size (mm)	Micro-material parameters		
砂層 (Ball)		0.32~0.42	Ball radius = 2.5	Density	2600	kg/m <sup>3</sup>
				k <sub>n</sub>	9e2	N/m
				k <sub>s</sub>	3e2	N/m
礫石層	基質 (Ball)	0.32~0.42	Ball radius = 2.5	Fric	0.577	
			Lock spin	40	%	
			Density	2600	kg/m <sup>3</sup>	
			k <sub>n</sub>	9e2	N/m	
			k <sub>s</sub>	3e2	N/m	
			Fric	0.577		
			Lock spin	40	%	
			Clump size (2a:2b:2c) = 23:23:14 (1.7:1.7:1)	Density	2600	kg/m <sup>3</sup>
				k <sub>n</sub>	9e2	N/m
				k <sub>s</sub>	3e2	N/m
				Fric	0.577	
牆體 (Wall)				k <sub>n</sub>	1e8	N/m
				k <sub>s</sub>	1e8	N/m
				Fric	0.577	

### 3.3.3 礫石層基本假設

數值分析中的礫石層假設方式如同物理試驗，基質的性質和砂層一樣，使用球顆粒組成，但數值分析中的基質顆粒半徑約為物理砂箱試驗中使用的基質顆粒半徑的 2.6 倍 (2.5mm/0.98mm)；礫石則使用球團 (clumps) 來模擬橢球形顆粒，微觀參數如表 3.3。

礫石的製作流程係首先利用 SketchUp3D 繪製橢球體，再以「.stl」檔案形式匯入 PFC<sup>3D</sup> 中。接著在 PFC<sup>3D</sup> 中使用「clump」指令，將鋼體顆粒以自行設定的重疊關係填充於橢球體內部，此種生成方式形成表面凹凸不平的礫石顆粒，模擬真實情況下，因為礫石顆粒不全然平整而允許受到多點接觸的受力行為。此礫石模型的效果如同 Chang et al. (2003) 所使用的複合圓形顆粒模式。

粒形參考砂箱試驗中所得到的長徑比 (a/c)，約為 1.7；而透過頭前溪河床的野外觀察，以及 Woo et al. (1982) 和 褚炳麟等人 (2014) 統計台灣各地卵礫石層的粒形發現圓盤狀的比例最高，故本研究將長軸與中間軸的比值 (a/b) 假設為 1，如圖 3.17。此外，礫石橢球顆粒皆假設為相同大小，長軸 2.3cm、中間軸 2.3cm 與



短軸 1.4cm，是物理砂箱試驗中可見到的尺寸。

數值分析中的礫石層生成方式同樣為孔隙率生成，設定孔隙率為 0.4，並設定生成區域內的礫石與基質的體積百分比，生成後先鎖定礫石橢球顆粒的旋轉功能，讓礫石可以在固定的方向上排列，之後再進行重力平衡，如此可以得到水平沉積或具有覆瓦狀構造的礫石層。

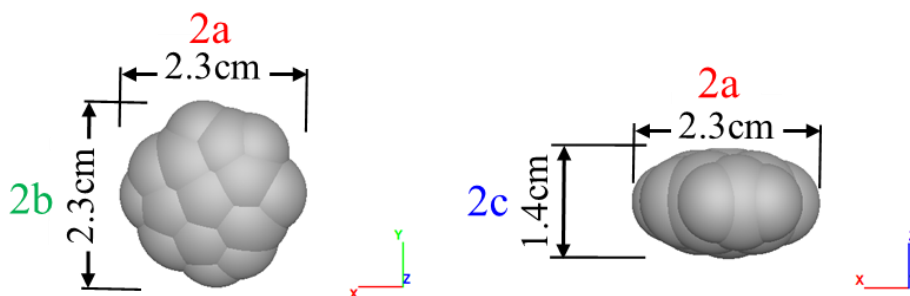


圖 3.17 數值分析中的礫石橢球顆粒

### 3.3.4 數值分析試驗規劃

當小尺度數值分析之微觀參數經過物理砂箱試驗的結果校核後，即進行參數敏感度分析，探討砂層與礫石層即其組構特性對逆斷層引致複合地層之變形影響。討論項目包含砂層與礫石層的堆疊情形，以及不同礫石體積含量、不同礫石長徑比與不同礫石排列方向的變形結果，試驗規劃如表 3.4。

表 3.4 小尺度數值分析試驗規劃

分析目的	控制因素			
	地層種類 (厚度比)	礫石體積含量 (%)	礫石長徑比 (a:b:c)	礫石排列方向 (與水平夾角)
地層種類之影響	單一砂層、 單一礫石層、 礫石層上覆砂層 (1:1)、 砂層上覆礫石層 (1:1)	70	1.7: 1.7: 1	0°
礫石體積含量之影響	砂層上覆礫石層 (1:1)	20, 45, 70	1.7: 1.7: 1	0°
礫石長徑比之影響	砂層上覆礫石層 (1:1)	70	1.5: 1.5: 1, 1.7: 1.7: 1, 2: 2: 1	0°
礫石排列方向之影響	砂層上覆礫石層 (1:1)	70	1.7: 1.7: 1	+30°, 0°, -30°



## 第 4 章 逆斷層引致含礫石層之複合地層變形

### 4.1 現地調查成果

本研究前往新城斷層、三義斷層以及竹山槽溝（車籠埔斷層）進行現地調查，調查成果包含了觀察並量化礫石層和礫石在自然環境中的沉積情形，或受到斷層作用後的變形樣貌；結合現地拍攝照片與影像辨識方法所取得之礫石層組構特性與旋轉角度。

#### 4.1.1 新城斷層

新城斷層的野外調查結果主要為取得斷層附近的河床礫石以作為砂箱試驗的材料，並結合自動影像辨識軟體取得礫石基本物理性質，成果如 3.2.2 節。此外，在圖 4.1(a)地點可觀察到河床礫石有覆瓦狀構造（圖 4.2），礫石的長軸與水平方向夾角約  $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ ，這項觀察作為後續探討礫石排列方向對於礫石層變形行為影響的依據；在圖 4.1(b)地點查核新城斷層的露頭（圖 4.3），觀察到新城斷層截切階地礫石層約 5 公尺的斷層帶，上盤卓蘭層已逆衝至地表，斷層傾角約  $25^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 。



圖 4.1 新城斷層野外地點與軌跡



圖 4.2 河道礫石之覆瓦狀構造



圖 4.3 頭前溪右岸的新城斷層露頭  $24^{\circ}47'18.42''N$   $121^{\circ}3'16.13''E$  (由對岸拍攝)

#### 4.1.2 三義斷層

由對岸觀察大甲溪右岸三義斷層斷層分支的露頭如圖 4.4，此處地層為階地礫石層、透鏡狀砂岩與頁岩，露頭右下角可發現桂竹林層逆衝於堆積礫石層中，斷層傾角  $35^{\circ}$  度。分析斷層尖端附近的礫石旋轉角度如圖 4.5，結果顯示位於下盤的礫石多往負方向旋轉（定義順時針為負），且靠近斷層滑動面附近的礫石旋轉角度為  $-30^{\circ}\sim-73^{\circ}$ ，上盤的礫石均為正方向旋轉，旋轉角度  $+20^{\circ}\sim+55^{\circ}$ 。



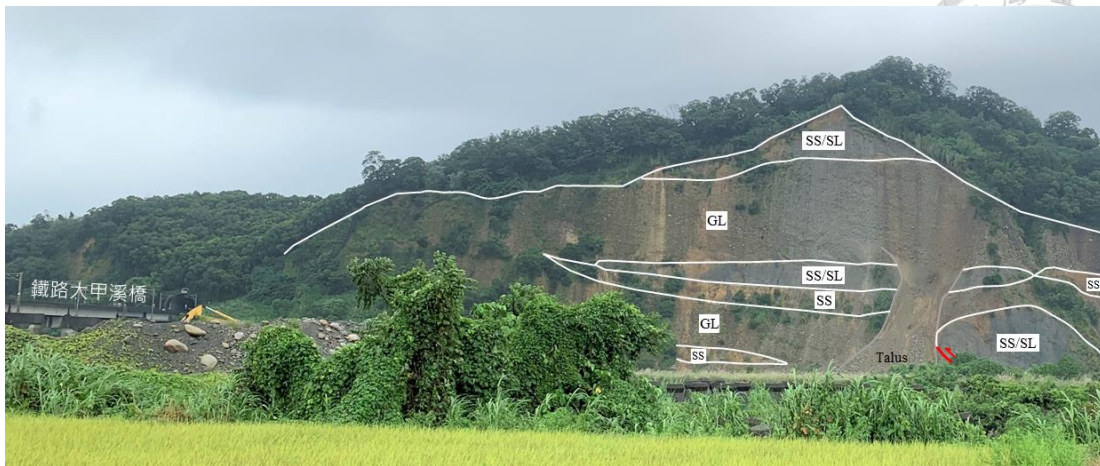


圖 4.4 三義斷層露頭 24°17'02.9"N 120°44'12.6"E (由對岸拍攝)



圖 4.5 三義斷層斷層尖端附近之礫石旋轉情形 (柳鈞元攝於 2017 年)

### 4.1.3 竹山槽溝

本研究在拍攝竹山槽溝北牆的礫石層剝片標本後，進行 Fiji 影像自動辨識軟體分析來取得礫石的組構特性。但是因為實際上的礫石顆粒顏色與基質相近(圖 2.16)，電腦無法清楚的圈畫出礫石顆粒的面積。因此在進行影像辯釋之前，先將拍攝照片列印成黑白照片，再使用黑色筆描繪圈選礫石顆粒來增加礫石與基質的對

比，以增加電腦的辨識能力。此外，有些礫石的距離太接近，電腦在自動判釋時會將多顆礫石連結成一顆礫石，因此將黑白照片匯入 Fiji 影像自動辨識軟體之前，還有再將圖片加工一次，明確分割每一顆礫石的面積，分析照片如圖 4.6 所示。影像分析結果總共捕捉了 213 顆礫石，最大的礫石長軸為 59 公分，最小可辨識的礫石長軸約 4 公分。統計長軸大於 10 公分的礫石，平均的長徑比為 1.68 (圖 4.7、表 4.1)。

礫石的含量的決定方式同樣透過自動影像辨釋來決定，先將拍攝照片轉為黑白影像，圈選欲分析的面積，開啟「門檻 (Threshold)」功能，軟體將透過色碼來區分面積含量，得竹山槽溝礫石面積含量為 45%。由於本研究假設之礫石為具有長徑比的橢球顆粒，故區分礫石與基質的粒徑分界係以是否考慮顆粒粒形的尺寸大小。參考褚炳麟等人 (1996) 針對每一個大於 1" (2.54cm) 的卵礫石才進行粒形分析的試驗方法，本研究將粒徑大於 1" (2.54cm) 以上的顆粒歸類成礫石。



圖 4.6 竹山槽溝北牆剝片礫石顆粒描繪



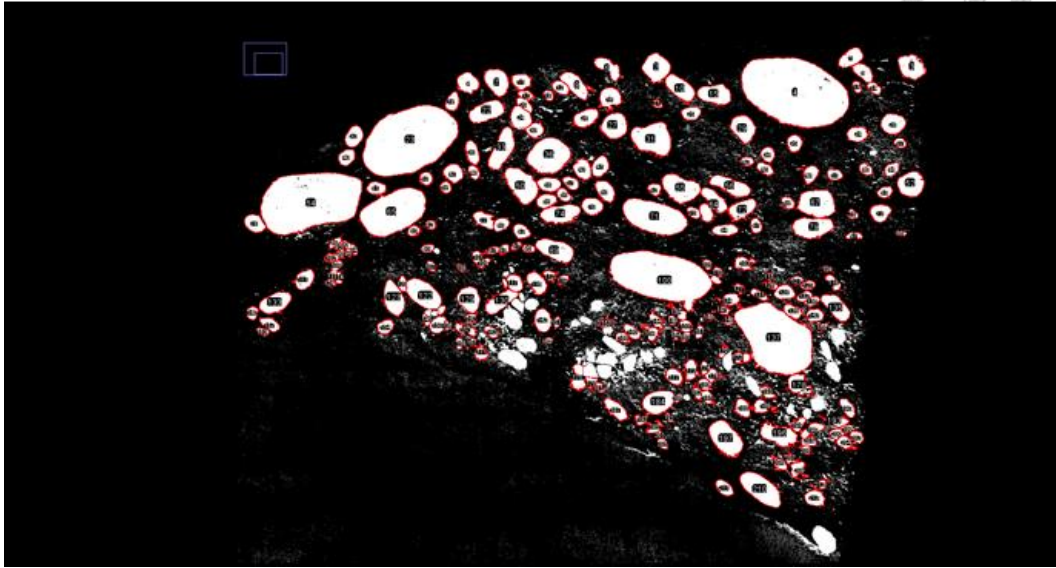


圖 4.7 影像分析捕捉的礫石

表 4.1 影像分析捕捉的竹山槽溝北牆礫石尺寸數據 (僅列出礫石面積>150cm<sup>2</sup>)

ID	面積(cm <sup>2</sup> )	Circularity	Roundness	長徑比 (AR)	長軸(2a)	短軸(2c)
4	1592	0.37	0.58	1.73	59	34
23	1370	0.48	0.61	1.64	53	33
54	1364	0.38	0.54	1.85	57	31
100	1111	0.25	0.43	2.31	57	25
137	1108	0.18	0.68	1.48	46	31
65	623	0.38	0.57	1.77	37	21
71	462	0.39	0.46	2.20	36	16
36	325	0.31	0.81	1.23	23	18
31	275	0.29	0.75	1.34	22	16
210	242	0.34	0.45	2.21	26	12
67	232	0.38	0.73	1.37	20	15
197	225	0.27	0.60	1.66	22	13
50	223	0.26	0.59	1.69	22	13
122	221	0.35	0.48	2.07	24	12
55	213	0.35	0.64	1.58	21	13
79	185	0.27	0.49	2.06	22	11
33	178	0.34	0.39	2.57	24	9
89	167	0.38	0.47	2.14	21	10
184	163	0.44	0.67	1.49	18	12
196	162	0.16	0.48	2.07	21	10
2	161	0.39	0.94	1.06	15	14
74	160	0.28	0.44	2.26	21	10
22	152	0.36	0.48	2.08	20	10



## 4.2 物理砂箱試驗

### 4.2.1 單一砂層砂箱試驗

透過單一砂層砂箱試驗可以先理解純砂層之變形行為，作為後續探討複合地層的比較依據。本試驗設定逆斷層傾角  $30^\circ$ ，地層厚度 20cm，抬升比從 0 至 0.25，即基盤垂直抬升量 0cm 至 5cm。為了描述砂箱結果，在此先定義斷層擴展距離 ( $W$ ) 與斷層滑動面位置如圖 4.8 所示，斷層擴展距離指的是斷層初始尖端投影至地表上與地表變形前緣的水平距離，並定義  $W/H$  為斷層擴展距離比，而紅色虛線即代表地層中的斷層滑動面位置。

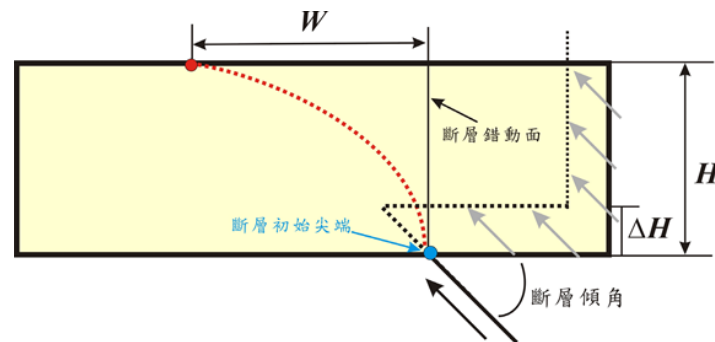
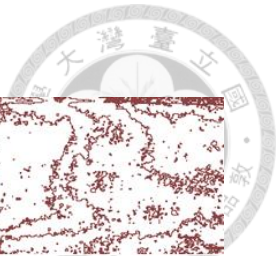


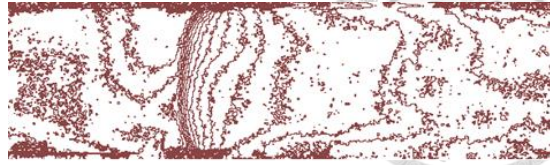
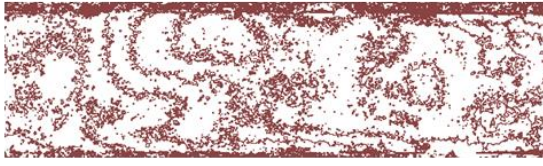
圖 4.8 逆斷層作用引致上覆土層斷層擴展及擴展路徑示意圖 (修改自 Cole & Lade, 1984) (註：H 代表上覆土層厚度； $\Delta H$  代表基盤之垂直抬升量。)

每垂直抬升 1cm 的變形情形如圖 4.9 所示，從砂箱側拍可以觀察斷層滑動面的發展過程，搭配由砂箱表面數值地形延伸製作的高精度之地形等高線(間距 2mm) 以及日照陰影圖可以更精確的得到斷層擴展距離。斷盤抬升的過程中，斷層滑動面由斷層尖端出發，色砂斷裂的地方與地表變形前緣的連線就是斷層滑動面的發展位置。本試驗只發育 1 條斷層滑動面，當抬升比為 0.15 時，第一條斷層破裂跡出露地表，後續仍沿著此滑動面滑動，只是擴展距離持續變大，且崖高持續變高，當達到試驗最終階段的抬升比 0.25 時，擴展距離  $W=1.47H$ 。斷層滑動面發展情形與前人的觀察相似 (Cole & Lade, 1984; Bray et al., 1994)，可以發現斷層破裂尖端一開始發育時，其斷層面角度較陡，當其發展到接近地表時，其角度變緩。

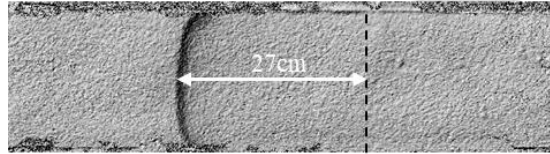




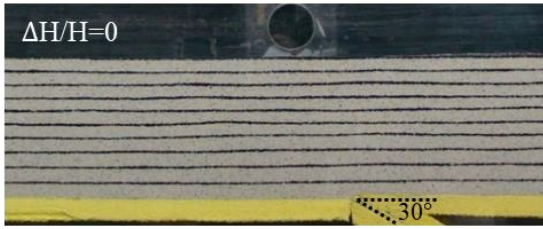
地形等高線 (俯視)



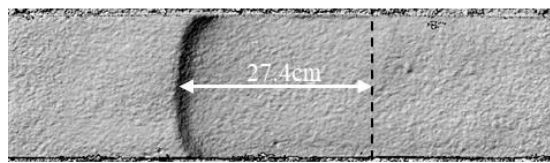
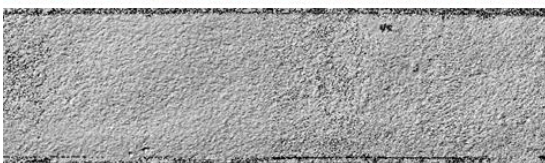
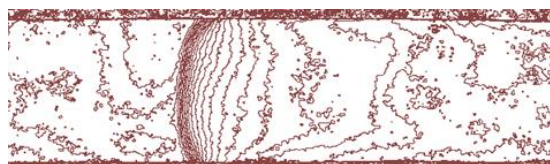
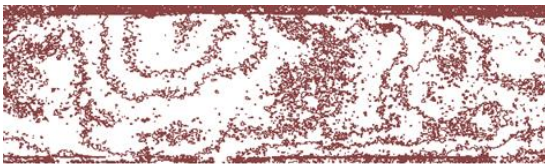
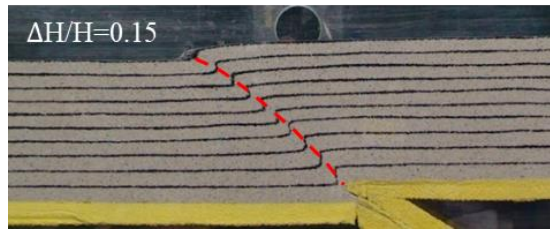
日照陰影圖 (俯視)



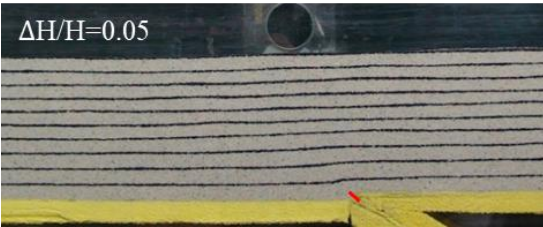
$\Delta H/H=0$



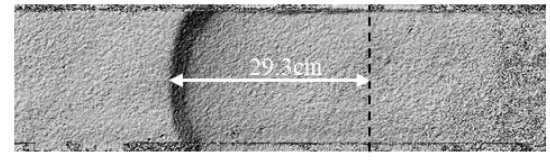
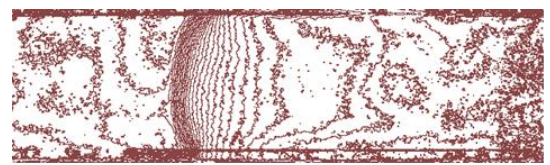
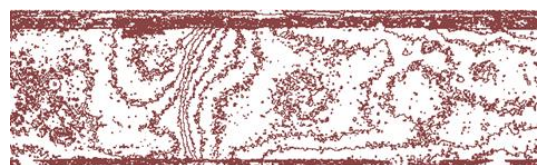
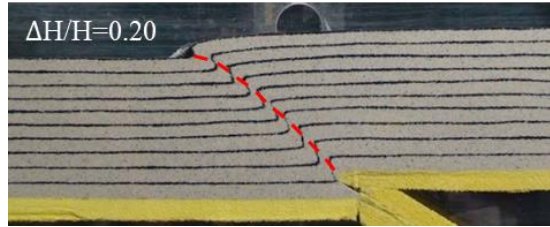
$\Delta H/H=0.15$



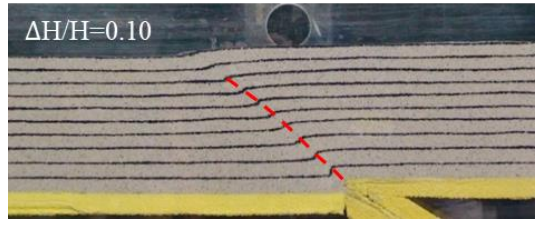
$\Delta H/H=0.05$



$\Delta H/H=0.20$



$\Delta H/H=0.10$



$\Delta H/H=0.25$

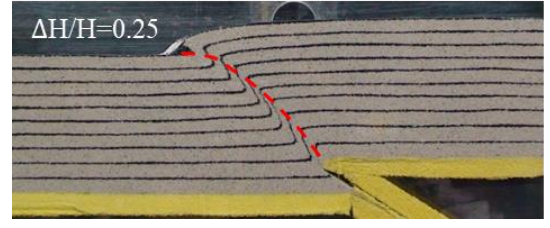


圖 4.9 單一砂層砂箱各抬升比之斷層滑動面發展與擴展距離 (逆斷層傾角  $30^\circ$ )





#### 4.2.2 複合地層砂箱試驗

參考新城斷層篤行營區 1 號槽溝剖面，初步假設複合地層為兩套砂層與礫石層互層，總覆土厚度為 20 cm，下層的礫石層較厚，厚度 7 cm，上層的礫石層較薄，厚度 3 cm。本試驗設定逆斷層傾角  $30^\circ$ ，抬升比從 0 至 0.25，即基盤垂直抬升量 0 cm 至 5 cm，試驗配置如圖 4.10 所示，從側拍圖可以看見在砂層中同樣設有指準層，在礫石層中則是看見有箭頭的彩色標籤，鋪設方法與材料參數詳見第 3.2 節。

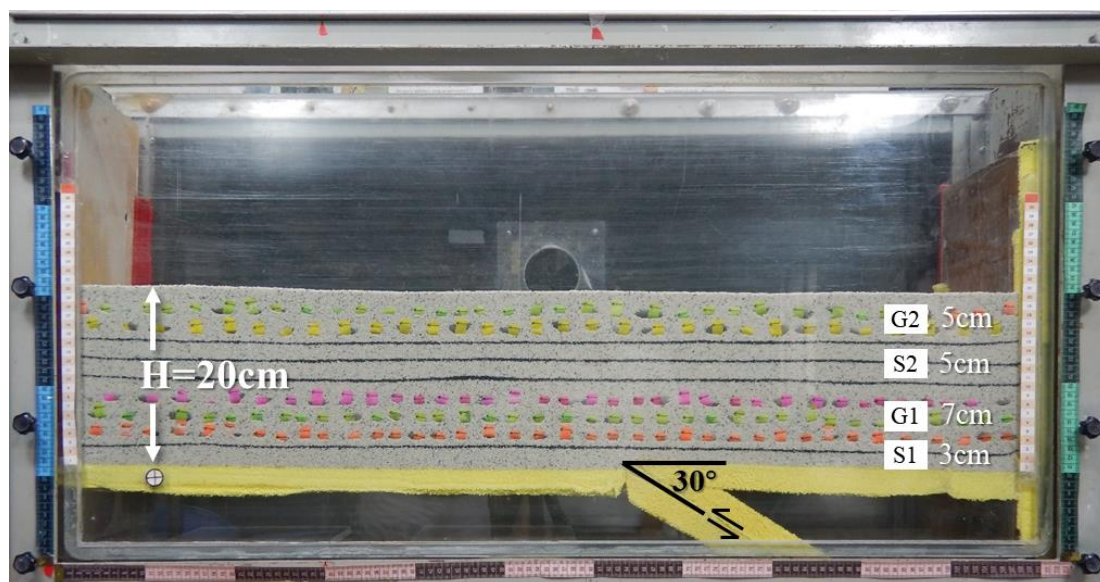
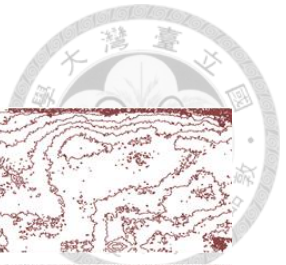


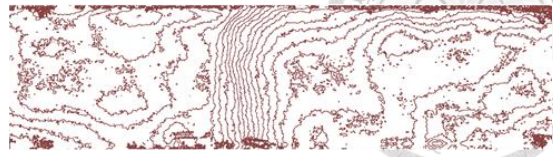
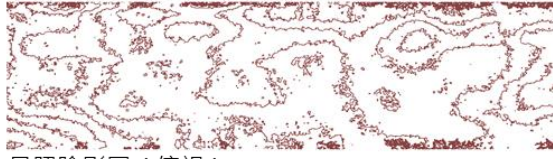
圖 4.10 複合地層砂箱試驗配置圖

在複合地層砂箱試驗中，每垂直抬升 1cm 的變形情形如圖 4.11 所示，同樣從砂箱側拍可以觀察斷層滑動面的發展過程，搭配地形等高線（間距 2 mm）以及陰影圖來計算斷層擴展距離。第一條斷層滑動面在抬升比為 0.2 時才出露地表，原因為斷層破裂跡除了需要抵抗顆粒之間的摩擦力，有些能量還被用來轉動礫石，所以斷層破裂跡在經過礫石層時發展得比較慢。當達到試驗最終階段的抬升比 0.25 時，發育了第二條斷層滑動面至 G1 礫石層，擴展距離  $W=1.6H$ 。





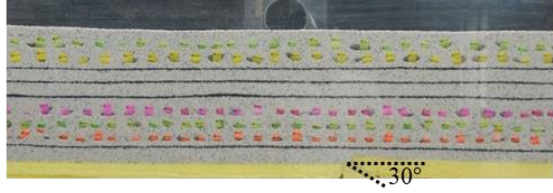
地形等高線 (俯視)



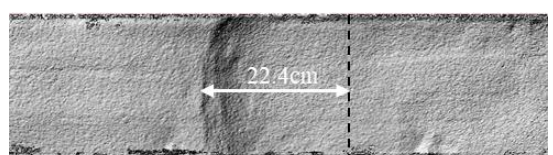
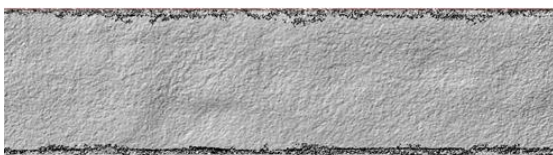
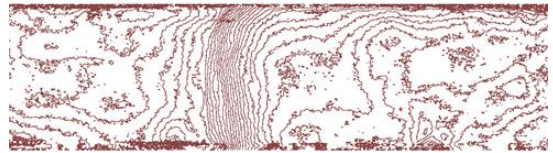
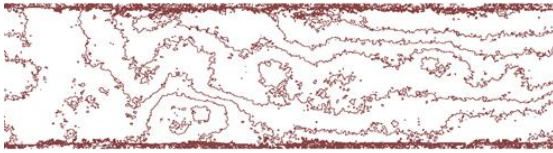
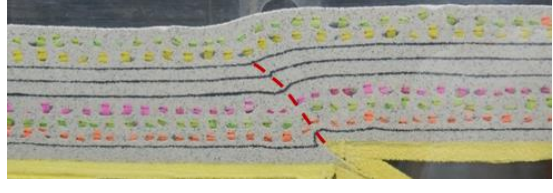
日照陰影圖 (俯視)



$\Delta H/H=0$



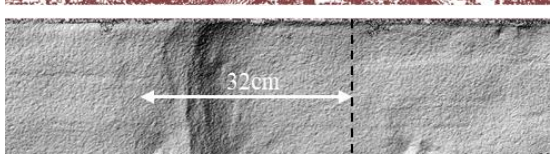
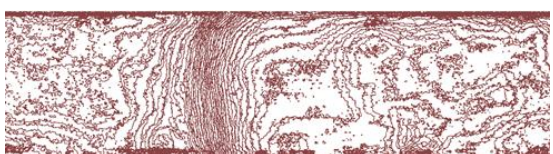
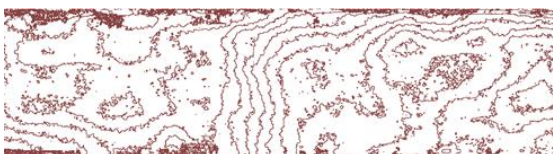
$\Delta H/H=0.15$



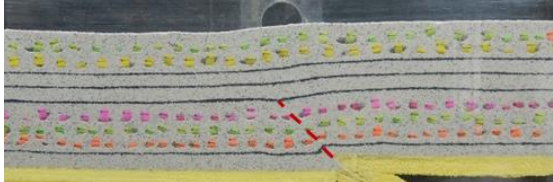
$\Delta H/H=0.05$



$\Delta H/H=0.20$



$\Delta H/H=0.10$



$\Delta H/H=0.25$

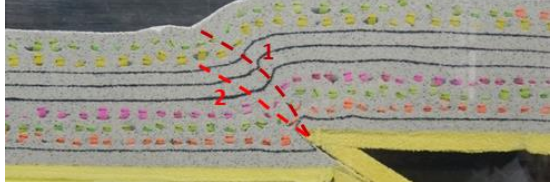
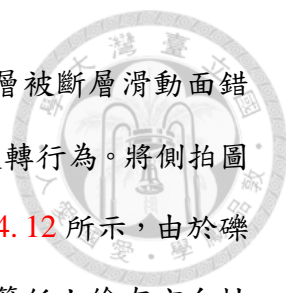


圖 4.11 複合地層砂箱各抬升比之斷層滑動面發展與擴展距離 (逆斷層傾角 30°)



觀察斷層推動複合地層砂箱的過程中，砂層同樣可見指準層被斷層滑動面錯斷的樣貌，而斷層滑動面經過礫石層時可以發現附近的礫石有旋轉行為。將側拍圖匯入 ArcGIS，數化受斷層影響的變形範圍內的礫石旋轉角度圖 4.12 所示，由於礫石的轉動可以分成順時針轉動與逆時針轉動，故在一開始在標籤紙上繪有方向性的箭頭標示，在此定義順時針轉動為正，逆時針轉動為負。

統計各抬升比之三顆最大礫石旋轉量如圖 4.13，可觀察到礫石的旋轉角度隨著抬升比愈大，旋轉角度愈大。抬升比 0.05、0.1、0.15、0.2 和 0.25 之下的 G1 礫石層的最大旋轉角度分別為 15°、20°、39°、71°和 89°，G2 礫石層的最大旋轉角度分別為 10°、17°、34°、66°和 74°，顯示在各抬升比之下，G1 礫石層的最大旋轉量均比 G2 礫石層大。當抬升比大於 0.15 之後，正方向的最大旋轉量大於負方向的最大旋轉量。又若以每個 30°度做為區分，可發現當抬升比大於 0.1 時，最大旋轉角度會大於 30°；當抬升比大於 0.2 時，最大旋轉角度會大於 60°。

觀察礫石有旋轉的的分布位置，可以發現它們都在一以斷層尖端為頂點，向地表發展的三角形範圍內，此與 Allmendinger (1998) 提出的三角剪切帶運動學模式相當，顯示礫石層內的礫石轉動可以指示三角剪切帶的範圍，此部分將於第 4.3 節的數值分析中進行更詳細的討論。從礫石是否持續旋轉的趨勢也可以得知，斷層滑動面在發展時會擾動周圍土體使得附近的礫石開始轉動，且就算斷層滑動面已經繼續向上發展，斷層滑動面周圍的礫石仍然持續轉動，推測是因為礫石層中的滑動面並非完美的弧面，滑動面必須繞過堅硬且尺寸相對大的礫石，所以會讓礫石持續轉動且會影響其他的礫石，此為互鎖效應的表現。



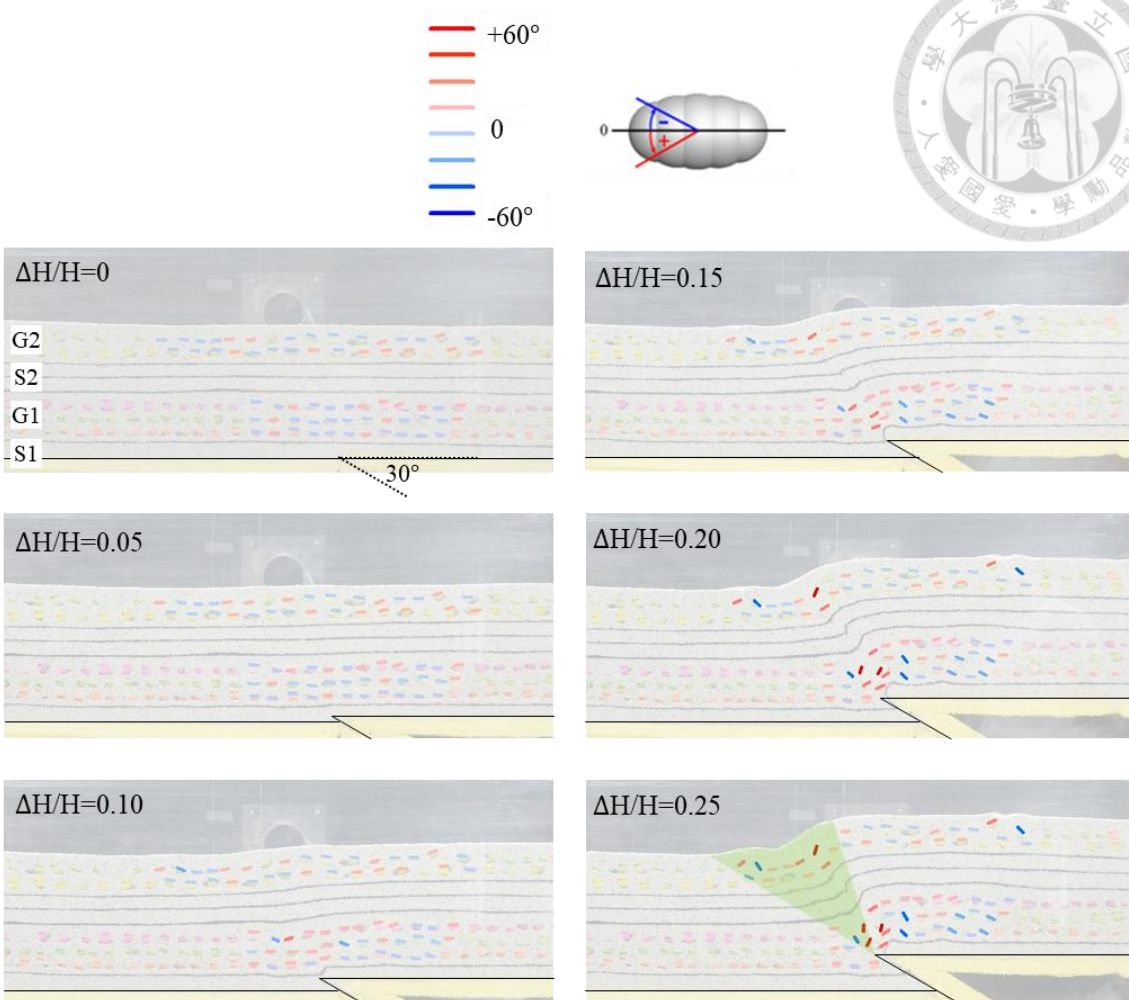


圖 4.12 複合地層砂箱各抬升階段之礫石旋轉角度

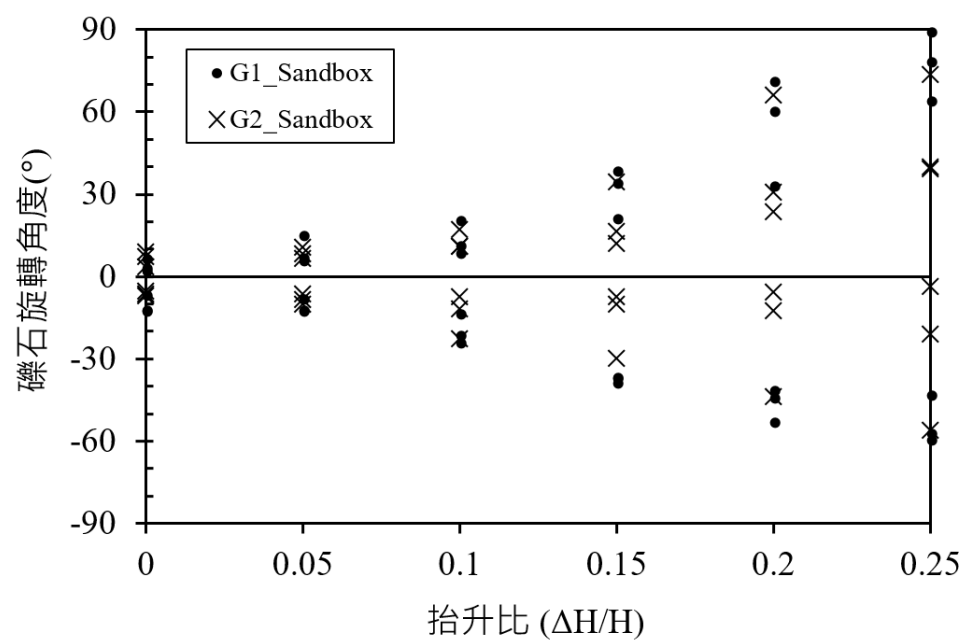


圖 4.13 砂箱試驗各抬升比之礫石最大旋轉角度



### 4.2.3 觀察重點與討論

藉由單一砂層的砂箱試驗，可以觀察到不同抬升比之下的地表變形樣貌、斷層滑動面位置與發展過程以及斷層擴展距離。複合地層的砂箱試驗也可以觀察到上述的物理現象，除此之外，還可以觀察到礫石層中的礫石在地層變形的區域內有轉動行為，視覺化了三角剪切帶的位置。透過物理砂箱試驗了解基本的變形行為及初步量化物理現象後，接下來將使用數值分析軟體進行更精確的定量分析以及參數敏感度分析，砂箱試驗所觀察到的地表變形、滑動面發展過程與礫石旋轉分布情形將是數值分析模擬結果的比對依據。

比較單一砂層（圖例代號 S）與複合地層（圖例代號 SGSG）的斷層擴展距離如圖 4.14，當抬升比為 0 與 0.05 時，由地形等高線與日照陰影圖看不出地表起伏，故不列入討論。當抬升比為 0.1~0.2 時，單一砂層的擴展距離較複合地層大約 0.3H，當抬升比為 0.25 時，複合地層的擴展距離較單一砂層大約 0.1H，顯示兩者擴展距離有所消長但當抬升比為 0.25 時並無明顯差異。然而觀察整體地形的起伏明顯不同，單一砂層在變形前緣明顯較陡，而複合地層的地表起伏較平緩但變形範圍較廣，因此在後續的數值分析描述地表變形時，嘗試利用地表影響範圍來定義。

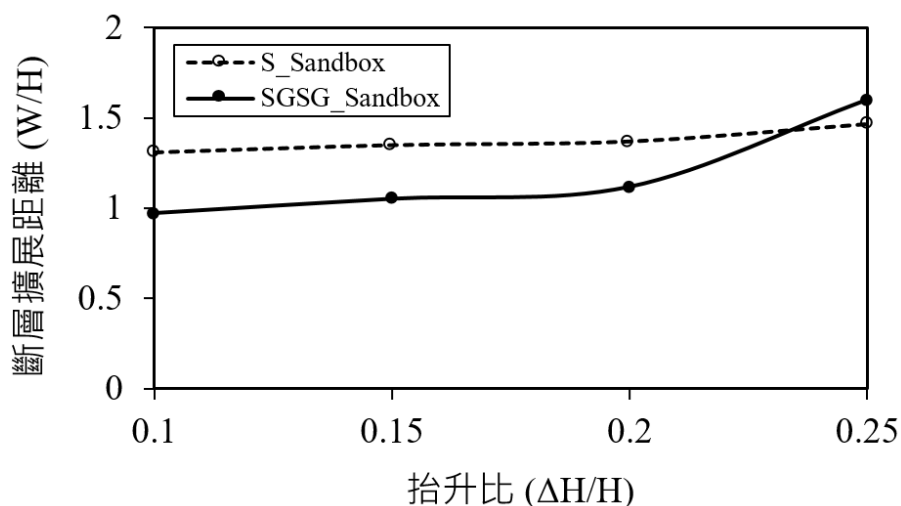


圖 4.14 單一砂層與複合地層砂箱試驗之斷層擴展距離



### 4.3 數值分析比對砂箱試驗

此小節比對物理砂箱試驗與小尺度數值模型的結果，小尺度數值模型的微觀參數如表 3.3 所示，礫石層中的礫石含量設定為 70%。

#### 4.3.1 斷層滑動面發展與地表變形

斷層破裂跡在砂層之中可以藉由指準層的相對位移定義其發展位置，然而在礫石層中，斷層錯動會使礫石顆粒旋轉又擾動附近的基質球顆粒，因此礫石層中的顆粒受擾動較大，無法利用顆粒的相對位移來觀察斷層破裂跡，故在數值分析中是透過紀錄每一小段錯動過程來判斷斷層滑動面錯動的位置。

單一砂層物理砂箱與數值模型的斷層滑動面發展如圖 4.15 所示，斷層滑動面皆在抬升比 0.15 時破裂至地表，且至抬升比 0.25 時都只發展出一條。指準層摺曲的結果也類似，在抬升比 0.15 時，滑動面附近的地層尚未倒轉；抬升比 0.25 時，物理砂箱觀察到滑動面附近的所有地層都有倒轉，而數值模型中，滑動面附近的地層則幾乎垂直，有的則些微倒轉。分別取物理砂箱與數值模型中央剖面最上層的顆粒位置繪製地表變形如圖 4.16，斷層擴展距離幾乎一致。

複合地層物理砂箱與數值模型的斷層滑動面發展如圖 4.17，第一條斷層滑動面皆在抬升比 0.2 時破裂至地表，至抬升比 0.25 時，第二條斷層滑動面發展至 S2 砂層。指準層摺曲的結果也良好的擬合，砂層都沒有倒轉。取物理砂箱與數值模型砂箱中央剖面最上層的顆粒位置繪製地表變形如圖 4.18。

物理砂箱與數值模型的比對結果顯示斷層滑動面發展與地層變形樣貌可以良好的擬合，但是地表變形較不相同。在單一砂層砂箱的比對中，部分數值模擬的地表變形較緩和，原因可能為真實世界中，砂箱砂顆粒為不規則形狀使得顆粒摩擦容易發揮，但數值模擬的顆粒為球型且尺寸較大。在複合地層砂箱的比對中，數值分析的地表變形前緣高度幾乎比砂箱試驗高，原因可能為數值分析中的基質顆粒較大，數值模擬中使用的基質顆粒半徑約為物理砂箱試驗中使用的基質顆粒半徑的



2.6 倍，(2.5mm/0.98mm)，當礫石旋轉而擾動附近基質時，容易形成孔隙而不易填滿，剪脹效應較明顯。

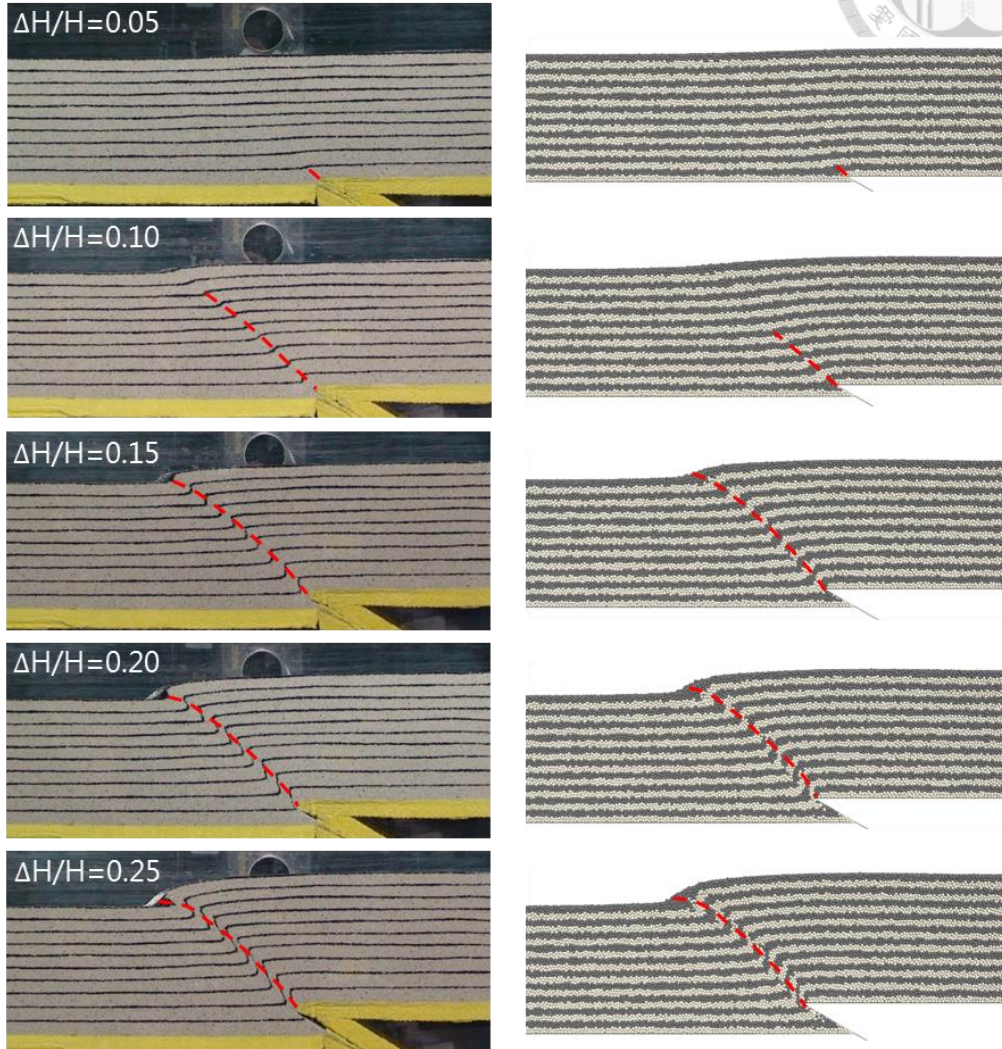


圖 4.15 單一砂層砂箱之斷層滑動面發展比對 (逆斷層傾角 30°)

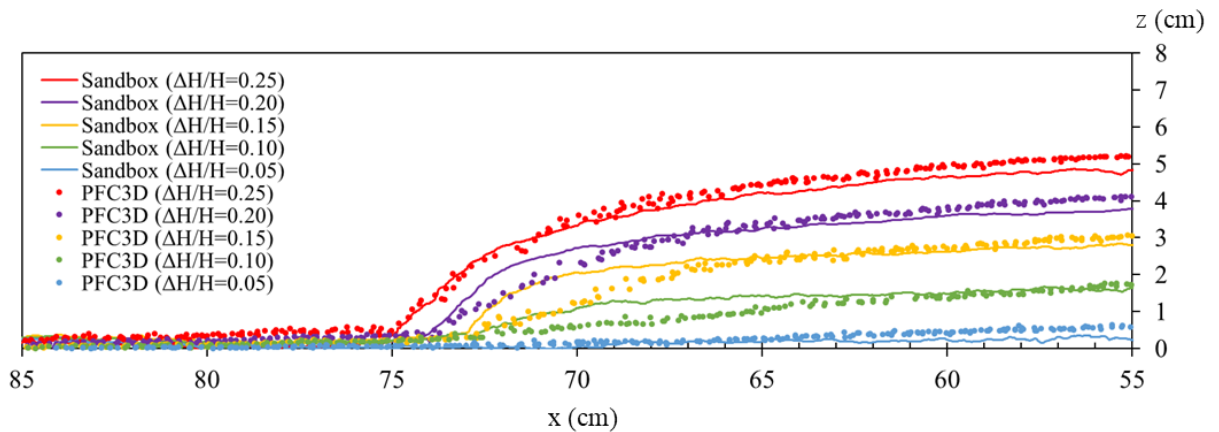


圖 4.16 單一砂層砂箱之地表變形比對 (逆斷層傾角 30°)



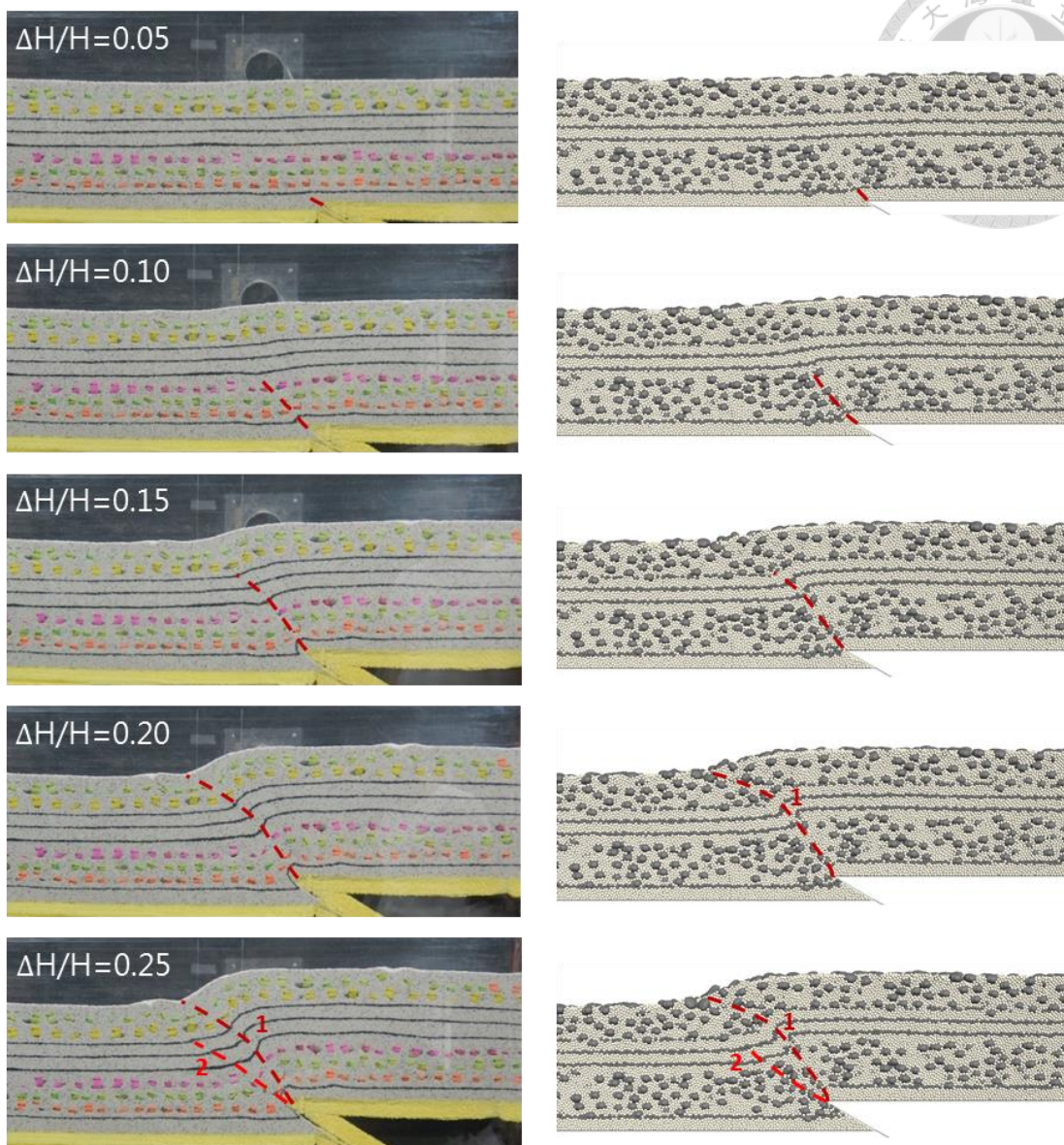
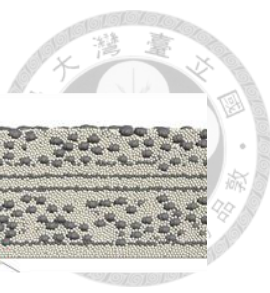


圖 4.17 複合地層砂箱之斷層滑動面發展比對 (逆斷層傾角 30°)

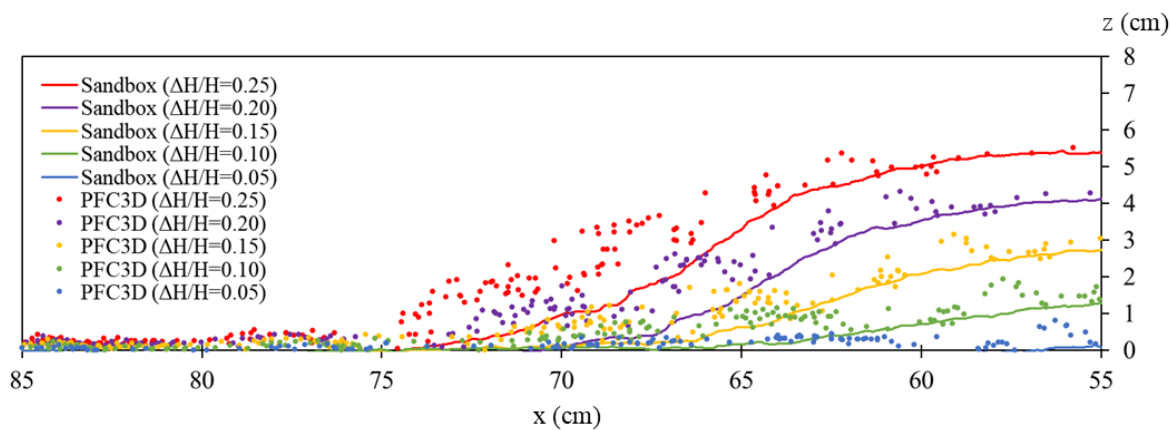


圖 4.18 複合地層砂箱之地表變形比對 (逆斷層傾角 30°)

由物理砂箱試驗與數值分析都可以觀察到單一砂層與複合地層之整體地形起伏明顯不同，單一砂層在變形前緣明顯較陡，而複合地層的地表起伏較平緩但變形範圍較廣，因此，描述地表變形除了可以利用斷層擴展距離，也可以用地表影響範圍來定義。地表影響範圍參考張有毅（2013）的定義方式，將地表變形回歸成 Gompertz 曲線，再將其一次微分得到地表變形斜率，並考量一般結構物差異沉陷所產生的角變量來設計，定義地表變形斜率 $>1/150$  的範圍為地表影響範圍（圖 4.19）。利用數值分析的結果比較單一砂層砂箱與複合地層砂箱的地表影響範圍如圖 4.20，單一砂層砂箱的地表變形在抬升比愈高時，地表變形斜率愈陡且地表變形範圍愈集中；複合地層砂箱的地表變形較緩，但上盤的部分有更大的變形。圖 4.21 比較單一砂層與複合地層在抬升比為 0.25 時的地表變形，可以發現複合地層砂箱的地表變形範圍較寬，且主要往上盤擴大，而變形前緣與斷層滑動面出露地表的位置與單一砂層砂箱相差不大，與物理砂箱試驗所觀察到的現象相同。

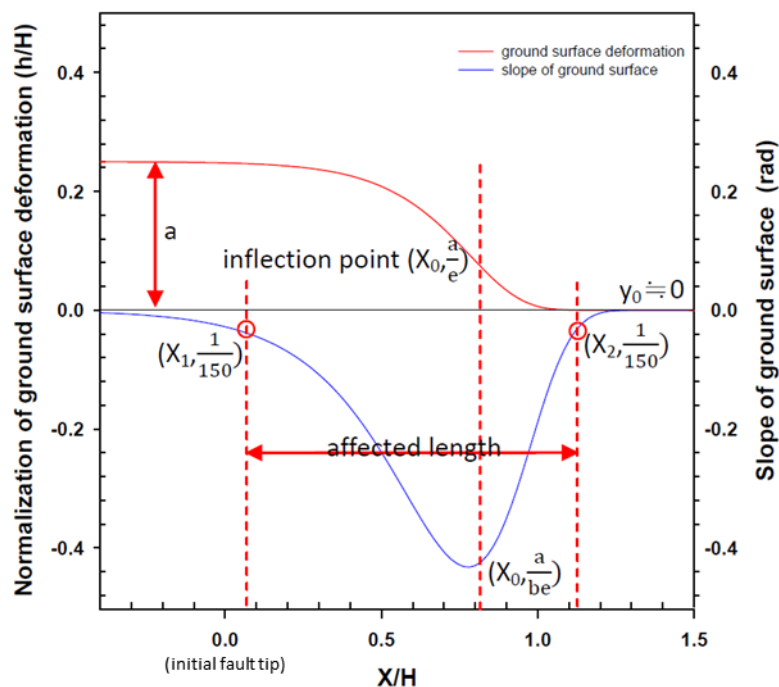


圖 4.19 地表變形與地表變形斜率之回歸式（修改自張有毅，2013）（註：X 為砂箱長度方向位置；H 代表上覆土層厚度；h 代表基盤之垂直抬升量。）

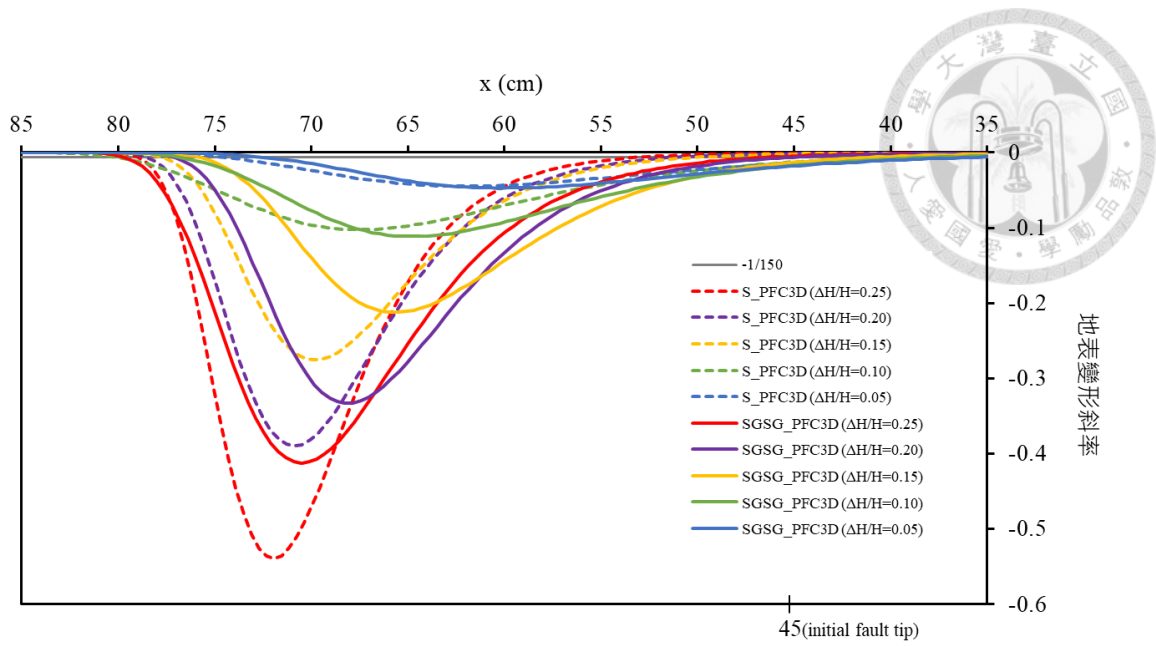


圖 4.20 單一砂層砂箱與複合地層砂箱之地表變形斜率與總地表影響範圍

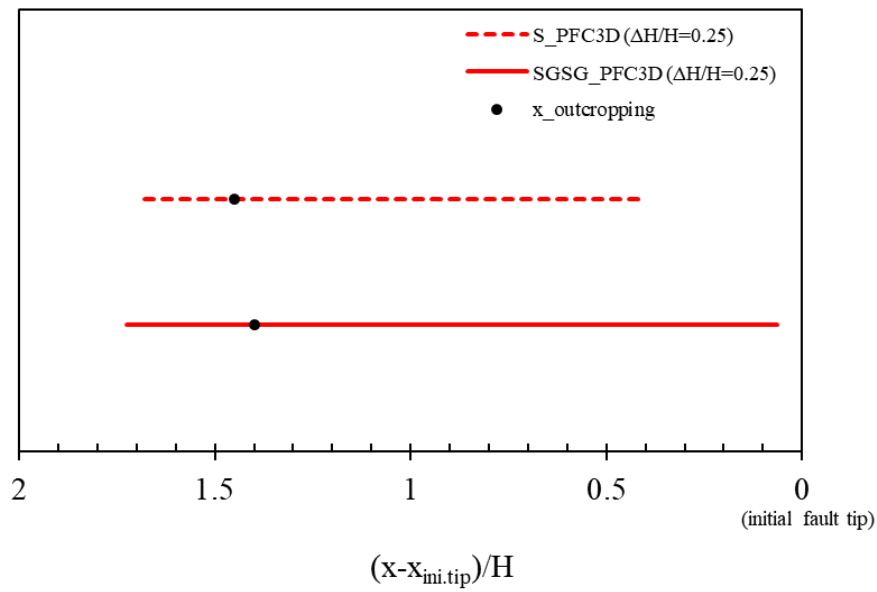


圖 4.21 單一砂層砂箱與複合地層砂箱之地表影響範圍 (抬升比 0.25)



### 4.3.2 礫石旋轉特徵

在野外觀察時，對於顆粒小且為圓球形的砂很難知道它的沉積歷史，但是粒徑大而且具有長徑比的礫石可以輕易地用肉眼判斷出它們的沉積方向，在槽溝中也可以看到橢球狀礫石沉積在不同的方向排列。PFC<sup>3D</sup>可以自動記錄所有顆粒的旋轉量，但為了與現地可觀察到的現象比較，以下僅呈現礫石的旋轉量。

在礫石初始沉積角度為 0°之複合地層數值模型中，選取中央剖面來觀察礫石的旋轉量，抬升比 0~0.25 的礫石旋轉情形與物理砂箱的比較結果如圖 4.22 所示，可觀察到礫石有旋轉的區域都在一以斷層端為頂點的三角形範圍內。

統計各抬升比之五顆最大礫石旋轉量如圖 4.23，可觀察到礫石的旋轉角度隨著抬升比愈大，旋轉角度愈大。抬升比 0.05、0.1、0.15、0.2 和 0.25 之下的 G1 礫石層的最大旋轉角度分別為 19°、71°、86°、88°和 88°，G2 礫石層的最大旋轉角度分別為 18°、51°、76°、84°和 85°，顯示在各抬升比之下，G1 礫石層正方向的最大旋轉量均比 G2 礫石層大；但觀察負方向則情況相反，原因可能為 G2 礫石層的礫石旋轉範圍較大且覆土壓力較小，礫石顆粒之間又更多機會往不同方向堆疊旋轉所致。當抬升比大於 0.1 之後，正方向的最大旋轉量大於負方向的最大旋轉量。又若以每個 30°度做為區分，可發現當抬升比小於 0.05 時，最大旋轉角度會小於 30°；當抬升比達 0.1 時，最大旋轉角度會大於 60°。

比較數值分析方法與物理砂箱試驗所得之最大礫石旋轉量都可以發現礫石隨著抬升比愈大而持續轉動，在抬升比達 0.05 之前，礫石的旋轉角度都會小於 30°，當抬升比達 0.25 時，可看見礫石長軸方向幾乎垂直。然而數值分析方法所得到的最大旋轉量普遍大於物理砂箱試驗的觀察，這是因為物理砂箱試驗只能觀察到一個剖面（即砂箱側視面）的旋轉量，而數值分析可以統計整個砂箱的三角剪切帶範圍。



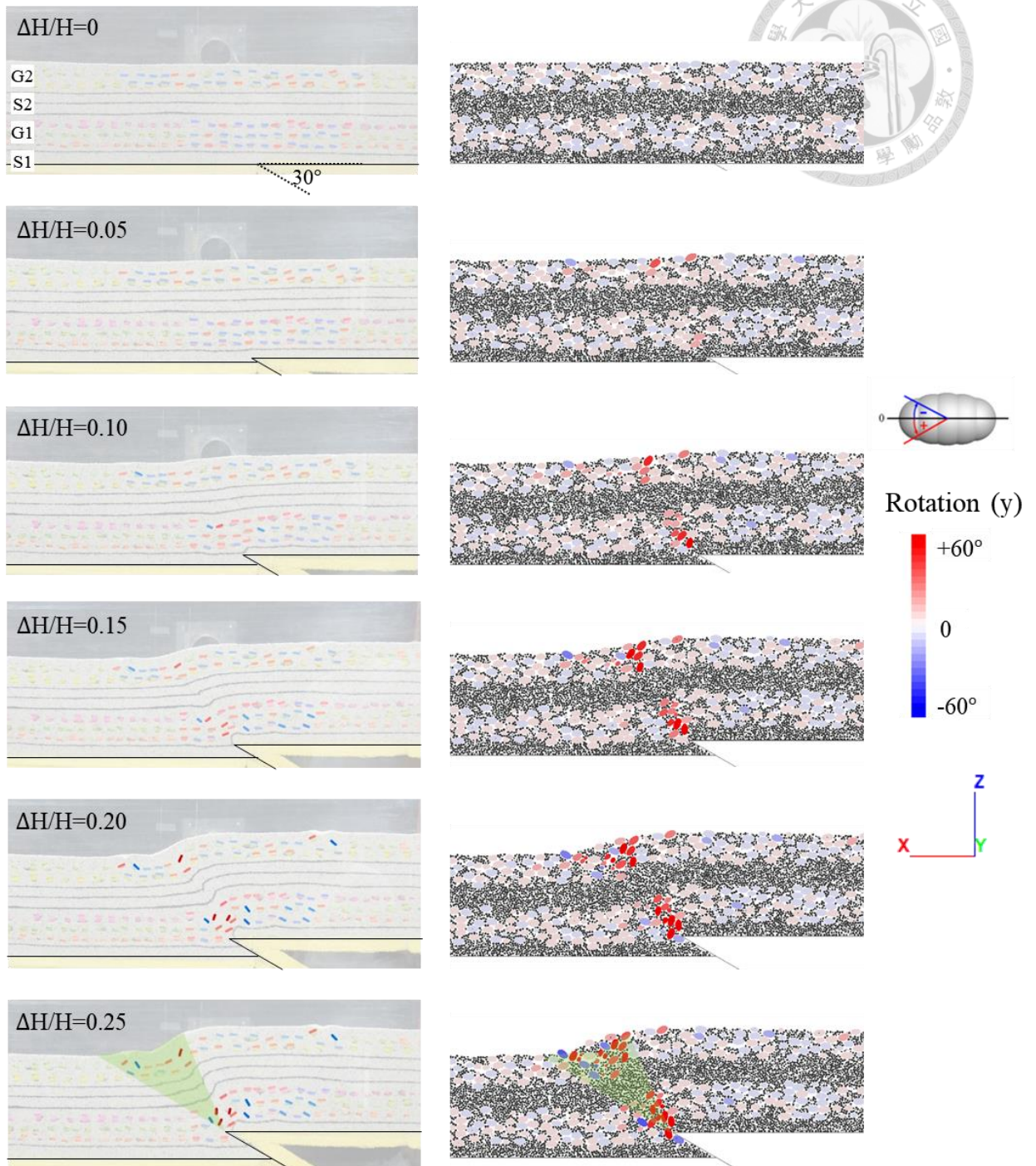
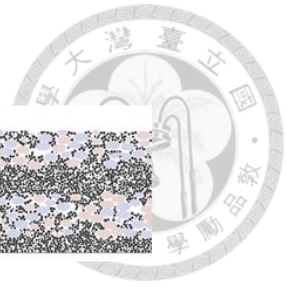


圖 4.22 複合地層砂箱與數值模型的礫石旋轉角度（逆斷層傾角 30°）

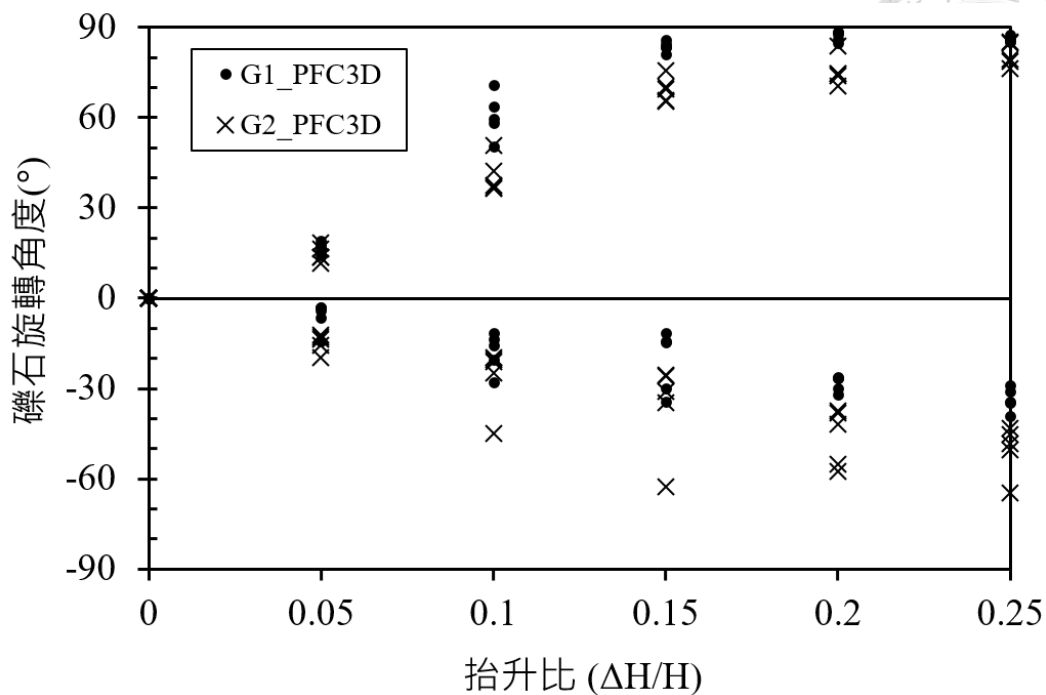
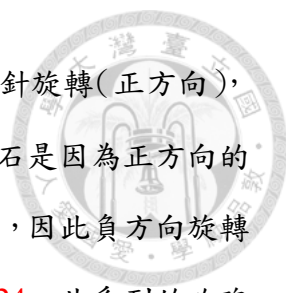


圖 4.23 數值分析各抬升比之礫石最大旋轉角度

根據 Allmendinger (1998) 的三角剪切帶的理論，其假設斷層為單一滑動面，斷層錯動形成的三角剪切帶向外、向上傳遞，靠近地表的土壤應變會逐漸累積，而曾經在滑動面兩側的土壤則不再受到影響。但在複合地層的砂箱與數值模型中，發現靠近斷層尖端的礫石仍然持續旋轉，這是因為斷層在礫石層中較難沿著一個固定的滑動面，會受到大顆礫石的阻礙，礫石密集的交疊且轉動時又互相影響，使得斷層滑動面可能並非一個弧面，故在整個斷層試驗的過程中，地層變形範圍裡面的礫石幾乎都會隨著抬升比的增加而持續轉動。也因此判釋礫石層中的滑動面位置時，僅以顆粒之間相對位移最明顯的線型來描繪。此現象如同卵礫石自然邊坡的破壞模式相似，潛在滑動面通常會繞過堅硬的礫石發展成鋸齒狀的滑動面 (Woo et al., 1982)。

此外，圖 4.22 中的半透明綠色色塊是一般繪製三角剪切帶的區域，但是從複合地層的砂箱與數值模型中都可以發現 G1 礫石層的礫石旋轉範圍已超出此區域，表示在礫石層中，同樣因為礫石的交疊轉動使得三角剪切帶擴大，此現象在下一小節 (第 4.3.3 節) 將進行更詳細的比對與討論。



觀察全部礫石的旋轉情形，發現礫石的旋轉方向大多是逆時針旋轉(正方向)，是由於逆斷層向上、向下盤推擠所致。而會出現負方向旋轉的礫石是因為正方向的礫石持續旋轉時，影響到了更靠近下盤且原本為水平沉積的礫石，因此負方向旋轉的礫石數量並不多。統計三角剪切帶中的礫石旋轉角度如圖 4. 24，此系列的玫瑰風向圖表示礫石的沉積角度與對應的礫石數量，而為了凸顯出礫石在抬升比較大的時候有較大的旋轉角度，統計圖均扣除 $\pm 20^\circ$ 內旋轉角度，並分成 G1 礫石層、G2 礫石層與 G1+G2 礫石層來統計。

抬升比為 0 時，所有礫石為水平沉積；抬升比 0 至 0.05 時，礫石旋轉角度均在 $\pm 20^\circ$ 以內，故同樣沒有繪製在此圖中。抬升比至 0.1 時，開始有礫石轉動超過 $\pm 20^\circ$ ，在 G1 礫石層和 G2 礫石層中，礫石大多是逆時針轉動，主要的旋轉角度分布在 $+30^\circ \sim +50^\circ$ 最多；順時針轉動的數量少，且最多至 $-35^\circ$ 。抬升比至 0.15 和 0.2 時，愈來愈多礫石轉動超過 $\pm 20^\circ$ ，且礫石轉動更加劇烈，此時的礫石一樣大多是逆時針轉動，礫石主要的旋轉角度為 $30^\circ \sim 40^\circ$ ，隨著旋轉角度愈高，礫石數量愈少。抬升比至 0.25 時，仍然有愈來愈多礫石轉動超過 $\pm 20^\circ$ ，礫石持續轉動至高角度，但可以發現礫石的轉動角度大致平均分散於 $+30^\circ \sim +88^\circ$ 之間，並無特別突出的轉動角度區間。

此外，比較 G1 礫石層和 G2 礫石層的差異可以發現，在抬升比為 0.15~0.25 時，G2 礫石層內轉動超過 $\pm 20^\circ$ 的礫石較多，符合三角剪切帶在靠近地表的地方影響的範圍較廣。在每個抬升階段，G1 礫石層都有較多高角度旋轉的礫石，顯示在斷層尖端或滑動面附近的累積的能量較大，地層應變較大。



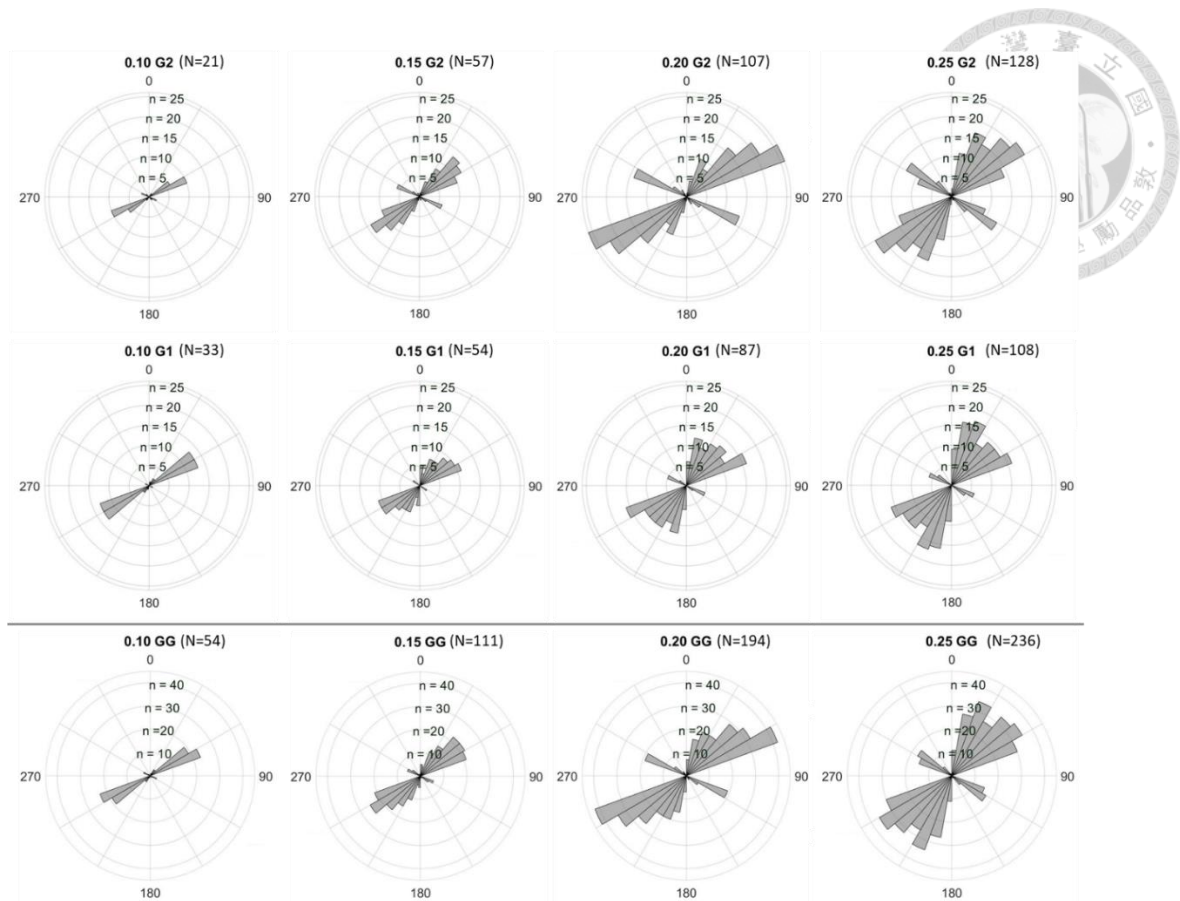


圖 4.24 抬升比 0.1~0.25 之礫石旋轉角度 (扣除 $\pm 20^\circ$ 內)

觀察三角剪切帶內的礫石旋轉角度可以證實隨著抬升比愈高，地層累積了更多的應變。而綜觀整個砂箱的旋轉角度分布情形可以了解三角剪切帶的範圍變化，如圖 4.25 所示，橫座標為砂箱長度，縱座標為礫石旋轉角度，為了統計整體的整體範圍，此礫石旋轉角度包含了正負方向。以抬升比 0.25 為例，分別統計 G1 礫石層與 G2 礫石層的礫石位置與其旋轉角度如圖 4.25 中的點，G1 礫石層的點分布集中且靠近斷層尖端，G2 礫石層的點分布較分散而遠離斷層尖端，顯示三角剪切帶是向上且向前擴散。圖中的曲線是利用常態分布繪製而成，抬升比 0~0.05 的礫石層以及抬升比 0.1 的 G2 礫石層旋轉角度太小，無法繪製出突出的峰值曲線，故沒有放在此圖討論。在同樣的抬升比之下，G2 礫石層的曲線寬度較 G1 礫石層的曲線寬度寬，且峰值高度較小，表示地層應變愈靠近地表時愈小，且變形量愈分散。比較不同的台生比可以發現曲線的寬度往 x 的方向愈來愈寬，表示三角剪切帶往下盤發展；峰值愈來愈高，表示礫石的旋轉角度愈來愈劇烈。



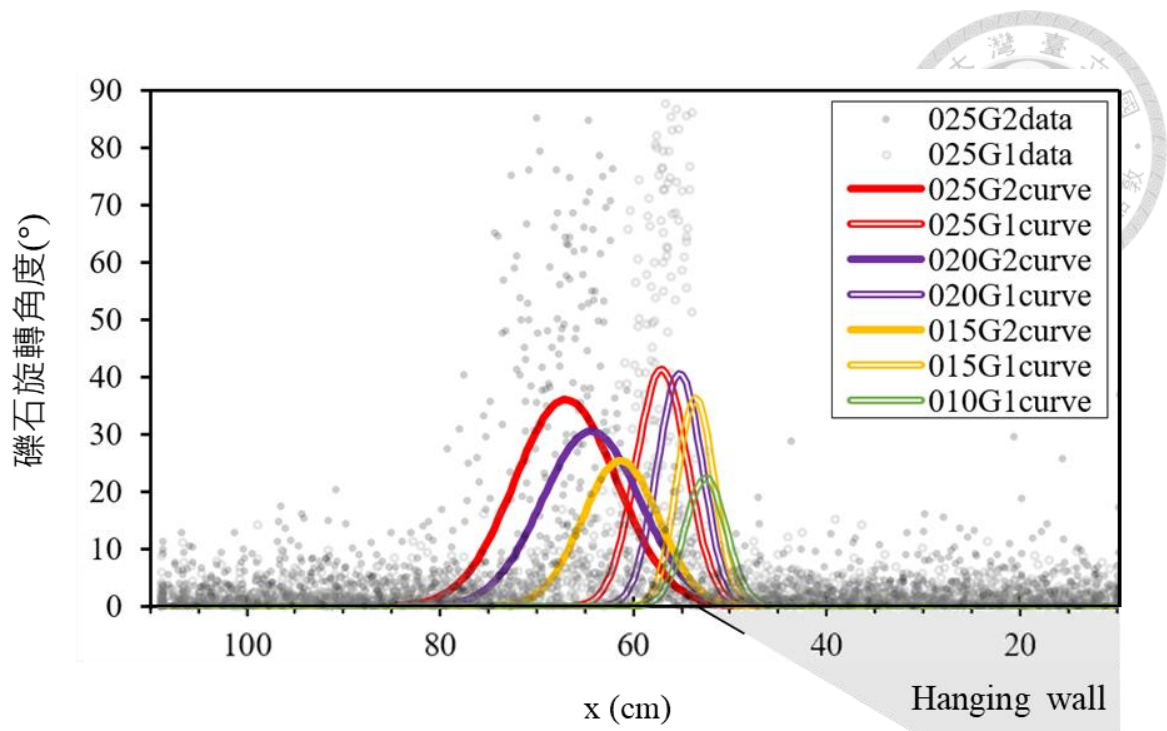


圖 4.25 抬升比 0.25 時的礫石位置與旋轉角度分布（斷層尖端初始位置  $x=45\text{cm}$ ）

本研究之複合地層為參考新城斷層篤行營區 1 號槽溝的配置，圖 4.26 是利用 ArcGIS 分析之礫石旋轉量的結果，在此照片中的斷層下盤並沒有記錄到 G1 礫石層的樣貌，只可見位於 G2 礫石層，而上盤的礫石層因為缺乏可定年的材料，故沒有可以比對的地層（參考圖 2.4 的礫石層分布）。根據本研究進行物理砂箱試驗與數值分析探討複合地層變形行為的結果，推測上盤的礫石層應比對 G1 或更深處的礫石層，原因剖面可以見到高角度排列的礫石，長軸方向與水平方向最大夾角為  $85^\circ$ ，且上盤礫石層變形前緣有許多負方向排列的礫石，最大角度為  $-73^\circ$ ，但下盤的 G2 礫石層中的礫石排列角度幾乎在  $\pm 30^\circ$  內。由前面討論的結果可推測 G2 礫石層沉積完成後，頂多經歷抬升比 0.1 之內的逆斷層作用歷史，但上盤的礫石層可能受到抬升比 0.25 或更大的逆斷層錯動。

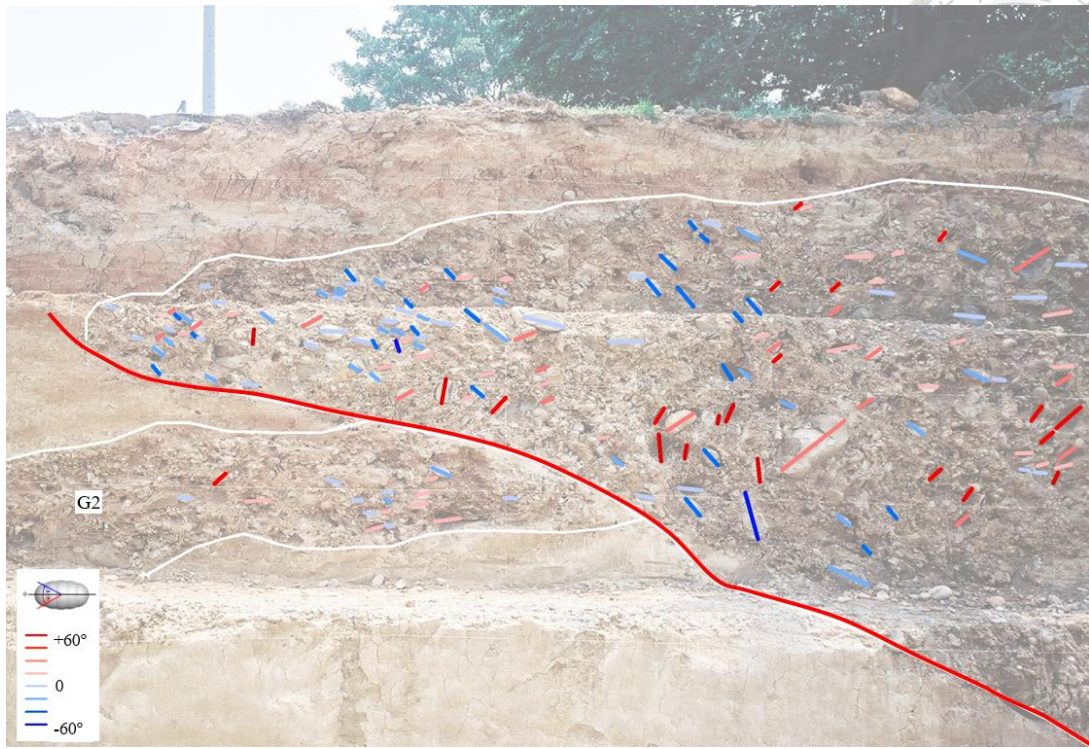


圖 4.26 新城斷層篤行營區 1 號槽溝之礫石旋轉角度



### 4.3.3 三角剪切帶

本研究的三角剪切帶指的地層受到斷層作用而曾經或正在變形的範圍，若是從連續體力學的角度來看，即是網格受剪力而扭曲變形的範圍。從物理砂箱試驗的側視圖來看地層的變形區域，大致上為一個以斷層尖端為頂點，向上且向下盤發展至地表的三角形範圍。物理砂箱試驗劃定三角剪切帶的方式為觀察指準層開始偏離原本沉積的水平線位置，單一砂層砂箱每 1cm 則鋪一層色砂，而在複合地層的砂層中，也鋪有 4 層色砂。此外，在複合地層砂箱試驗中，可配合礫石是否旋轉來判釋 (圖 4.27)。

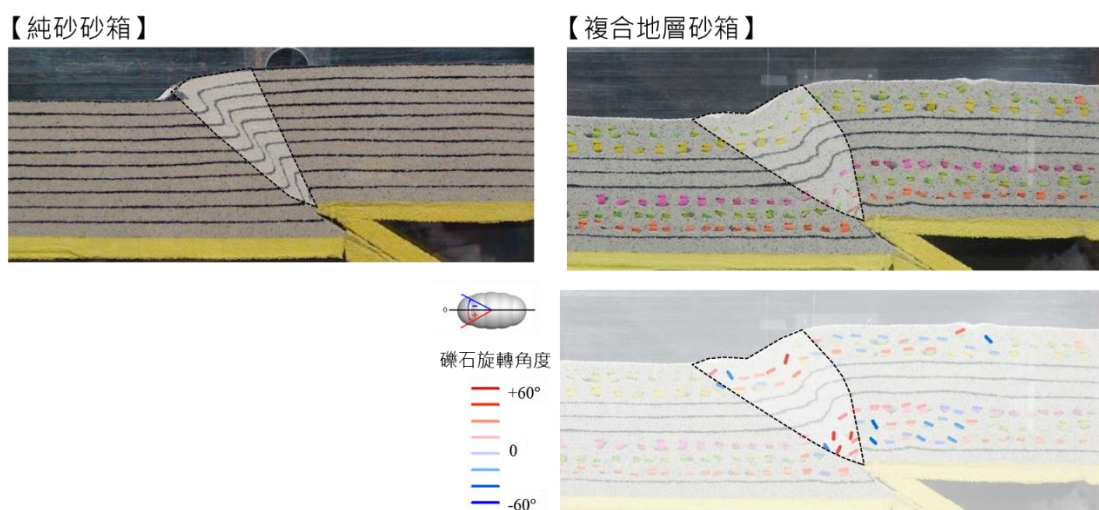


圖 4.27 單一砂物理砂箱與複合地層物理砂箱之三角剪切帶範圍

物理砂箱試驗提供了定性的結果，地層變形的範圍在一個三角形的區域中，而數值分析方法提供一個力學模式來重現斷層作用引致的地層變形，並且容易量化分析。王景平 (2002) 利用 FLAC<sup>2D</sup> 進行動力學模式分析，探討斷層錯動引致之上覆土層剪切帶的範圍，並與運動學模式所衍生的三角剪切帶模式比較結果。在其研究透過 FLAC<sup>2D</sup> 數值模擬中的小滑移量造成之質點位移分布與剪應變增量來判斷剪切帶之範圍。在本研究的數值模型中，將透過指準層、垂直方向位移與礫石轉動量相互比較來判釋與比較單一砂層與複合地層的三角剪切帶範圍，以抬升比 0.25 為例 (圖 4.28)，黑色虛線圈繪處為判斷的三角剪切帶範圍。



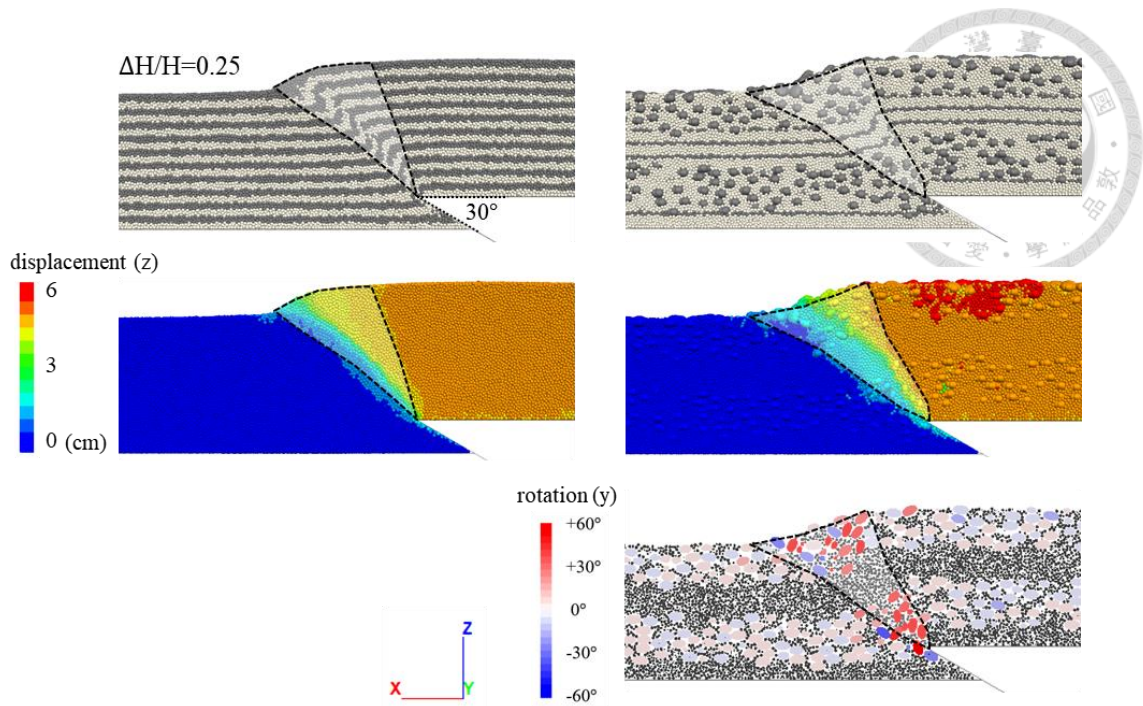


圖 4.28 單一砂箱與複合地層砂箱數值模型之三角剪切帶範圍

在 PFC<sup>3D</sup> 模型中，可以在任意選定的高度設定色砂，做為斷層推動之前的指準層，在單一砂層砂箱中，每 1cm 即變換一次砂顆粒的顏色；複合地層砂箱中，只有在砂層裡面間隔鋪設有 0.5cm 的指準層。使用指準層來判斷三角剪切帶範圍的方法與物理砂箱試驗中一致，即描繪指準層斷裂或明顯摺曲的地方。

垂直抬升量是從斷層開始推動前開始累計的 z 方向位移量，抬升比 0.25 對應的垂直抬升量為 5 公分，在單一砂層砂箱中，可以觀察上盤邊界的垂直抬升量為 5cm，符合三角剪切帶上盤為剛體運動的假設。然而在複合地層砂箱中，上盤有局部區域的垂直位移量大於 5 公分，應是在斷層抬升的過程中，礫石顆粒局部擾動的結果。利用垂直抬升量判釋三角剪切帶的方法分成上盤與下盤邊界，上盤邊界為垂直位移量開始不等於抬升量的地方，與三角剪切帶理論假設相同，為受到變形的土壤呈現剛體運動。下盤邊界大致上為零位移與開始有位移的地方，區分產生應變的界線。

利用礫石轉動量來判斷三角剪切帶的範圍是最容易的方法，有轉動的礫石即位在三角剪切帶內。這項指標不只能在物理砂箱與數值分析中辨認，在野外的觀察中，具有長徑比的礫石顆粒肉眼可見，在厚礫石層或沒有層面的沉積地層中，可做





為指示地層變形的指標。

比較單一砂層砂箱與複合地層砂箱的地層變形結果，可以發現地層變形的區域大致上為一三角形。在複合地層砂箱中，三角剪切帶範圍會隨著經過的地層不同而有不同的大小，在礫石層中的三角剪切帶會變大，在砂層中則比較小。雖然複合地層砂箱的三角剪切帶面積僅略大於單一砂層砂箱的三角剪切帶面積，但是單一砂層砂箱靠近三角剪切帶的下邊界部分的垂直位移量色帶變化較快，表示應變較集中，而複合地層砂箱的色帶則分布較平均，顯示礫石層雖然有較寬的三角剪切帶，但應變量較分散。

比較物理砂箱試驗與數值模擬的三角剪切帶結果，都可以發現單一砂層砂箱的三角剪切帶範圍較小，且三角剪切帶下界部分的地層變形嚴重，色砂明顯摺曲且斷裂，這是因為一直到抬升比 0.25 時都只有一條斷層滑動面；複合地層砂箱的三角剪切帶略大，因為斷層通過礫石層的時候會發展出較大的三角剪切帶，而由於在複合砂箱中發展兩條斷層滑動面，所以應變較不集中。複合地層中的有礫石旋轉的區域與三角剪切帶吻合，顯示具有長徑比的礫石是一個指示地層變形的良好指標。



## 4.4 數值分析參數敏感度

### 4.4.1 砂層與礫石層的變形特徵

在此小節的砂層與礫石層的數值分析模擬中，所使用的微觀參數如同表 3.3 所示，且假設礫石層中的礫石顆粒體積含量為 70%，斷層傾角設為  $30^\circ$ 。為了解斷層破裂跡在砂層與礫石層中的差異性，以下討論單一砂層、單一礫石層、礫石層上覆砂層與砂層上覆礫石層（地層厚度比皆為 1:1）四種情境模擬，如圖 4.29，列出抬升比 0.25 時的砂箱側視圖、垂直位移量以及礫石旋轉情形，協助觀察斷層滑動面以及三角剪切帶。

在單一砂層之中可以很明顯看到斷層滑動面位置，且只發展出一條，斷層崖的高度隨著斷層錯距愈大，高度愈高。在單一礫石層之中無法判斷斷層滑動面的發展情形，因為礫石顆粒旋轉且產生顆粒互鎖效應，但若觀察礫石的旋轉與否，可以定義出三角剪切帶的範圍。礫石層上覆砂層與砂層上覆礫石層的情況下也都只發展出一條斷層滑動面，只是當斷層滑動面由砂層進入礫石層時，其傾角變緩，而當斷層滑動面由礫石層進入砂層時，其傾角變陡。若觀察整體滑動面的傾角變化，都是在靠近地表時的傾角最小。另外，比較相同高度而不同地層的斷層滑動面傾角可以發現斷層滑動面在砂層中較陡，在礫石層中較緩。

比較上述四種情況的地表影響範圍如圖 4.30、圖 4.31，砂層上覆礫石層的地表變形範圍最大，但整體斜率較緩和；單一砂層的地表變形範圍最小，但地表變形的範圍較集中且劇烈。此外，礫石層在下的情況，地表影響範圍會更往上盤發展。

從垂直位移量以及礫石的轉動情形定義出三角剪切帶的範圍如圖 4.30 黑色虛線圈繪處。在此定義一  $\alpha$  角來表示三角剪切帶的範圍， $\alpha$  角的量測方式是以斷層尖端為頂點來計算三角剪切帶的夾角。綜合比較結果如表 4.2 所示。比較單一砂層與單一礫石層的情況可以發現，具有長徑比的礫石層會使得三角剪切帶範圍變大，這是因為橢球顆粒的互鎖效應，較容易影響到旁邊的礫石而一起轉動。而在砂層上

覆礫石層的情況下則反之，三角剪切帶進入砂層時有縮小的趨勢，但這個情況下的三角剪切帶範圍最大，因為下層礫石層互相堆疊旋轉的時候首先將應變範圍變大，當能量進入砂層時，不需要再克服礫石轉動，能量更容易擴散開來所致，也呼應了其地表影響範圍最大。

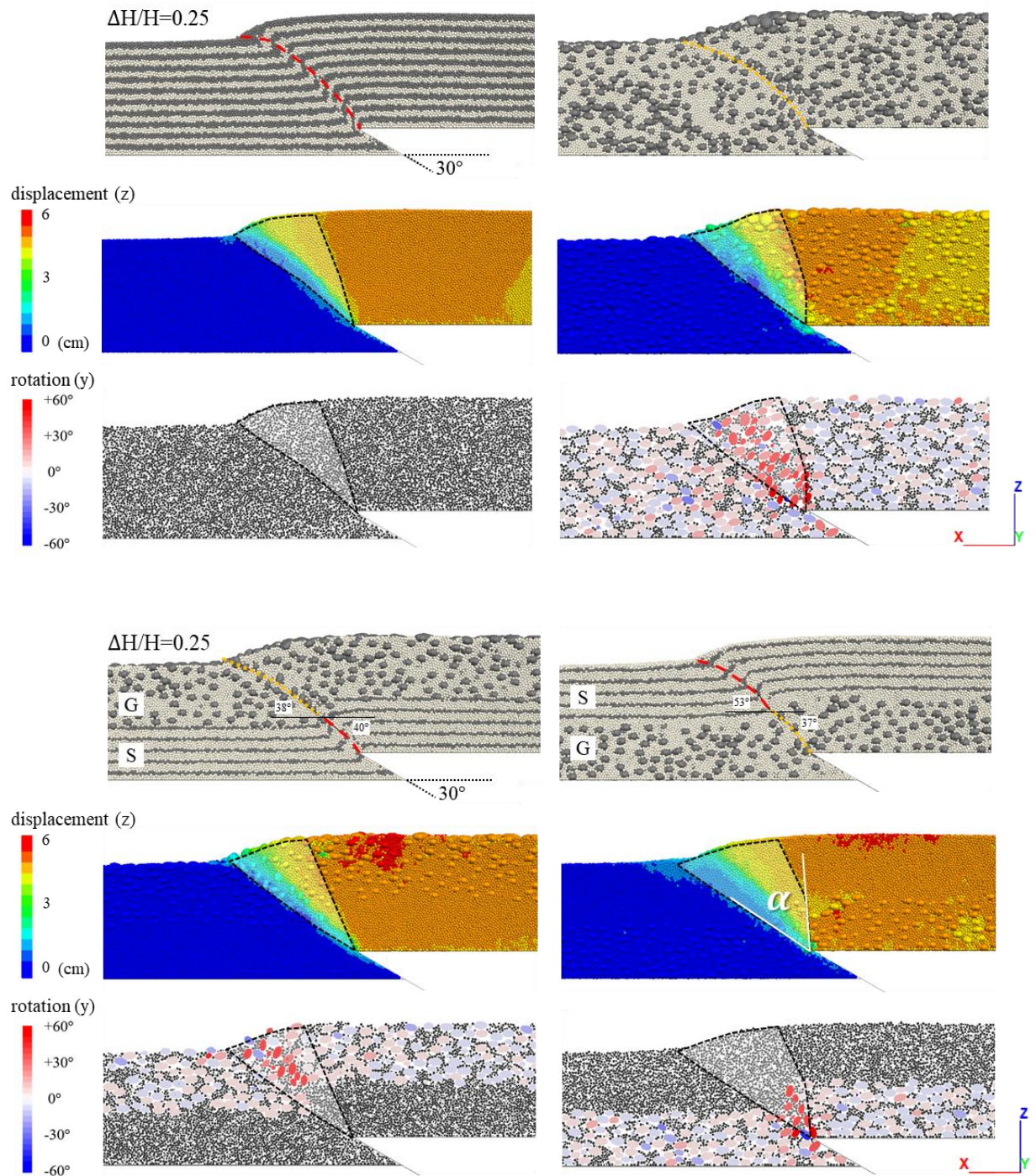


圖 4.29 砂層與礫石層之地層變形比較

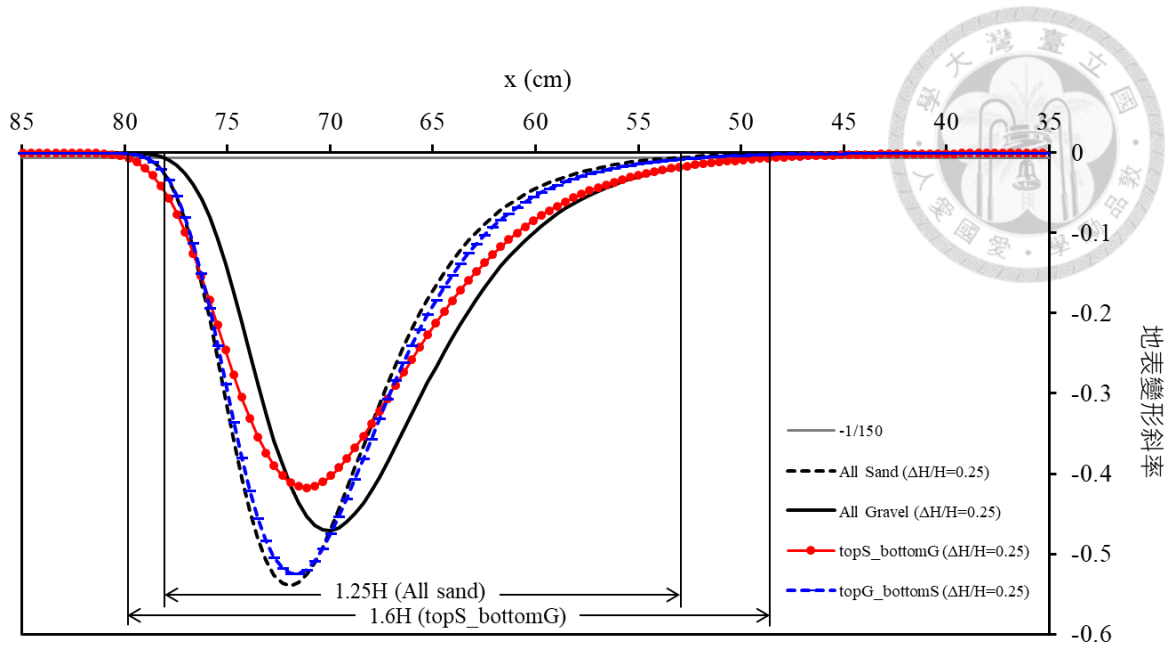


圖 4.30 四種砂層與礫石層組合砂箱之地表變形斜率與地表影響範圍

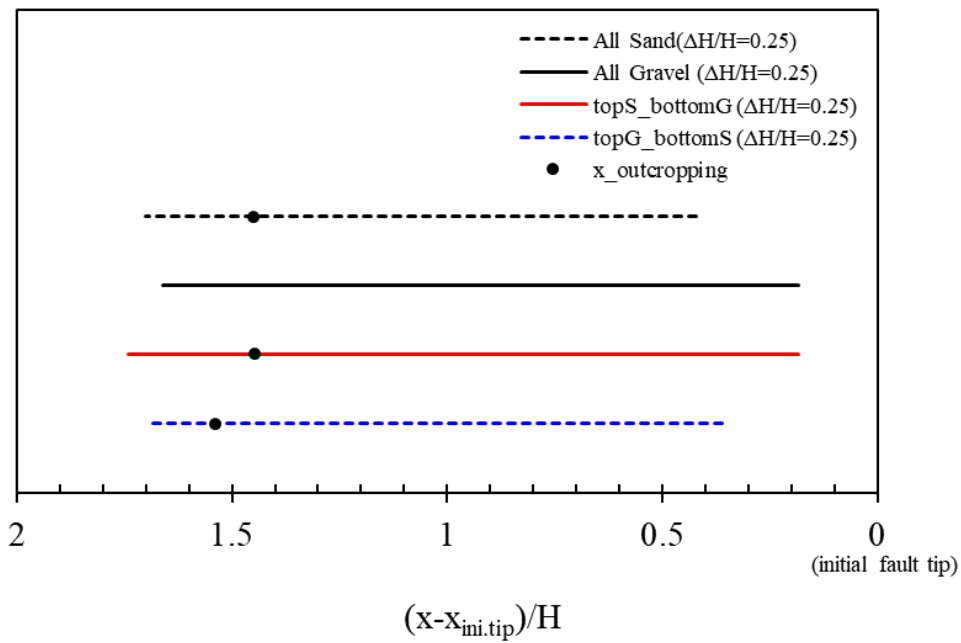


圖 4.31 四種砂層與礫石層組合砂箱之地表影響範圍 (抬升比 0.25)





#### 4.4.2 礫石層組構特性

本研究利用小尺度的數值模擬探討礫石層中的礫石顆粒特性與地層變形性的關係，討論項目包含有礫石體積含量、礫石長徑比以及礫石排列特性。

礫石體積含量是影響礫石層變形特性的最大影響因素，以下討論礫石含量為 20%、45% 與 70% 的情況 (圖 4.32)。當抬升比=0.25 時，礫石體積含量為 20% 或 45% 的礫石層會發展出兩條斷層滑動面，第一條靠近上盤，第二條往下盤發展，礫石體積含量 20% 砂箱的第二條斷層滑動面有發展至地表，在地表面形成主要斷層崖與次要斷層崖。礫石體積含量為 70% 的礫石層則只發展出一條破裂跡，在地表只有一個斷層崖。

觀察礫石層上的砂層指準層可以發現砂層大致上形成單斜構造，但礫石體積含量較高的情況下，單斜構造的背斜彎較寬，向斜彎較銳利，如圖 4.33 c。造成這樣構造上的差異可以透過切剖面的礫石來觀察，當礫石體積含量 20% 時，雖然礫石也有明顯的轉動量，但礫石之間還有基質填充，所以破裂跡可以在基質中發展；當礫石體積含量 45% 時，有些礫石開始直接接觸到另一個礫石，互鎖效應逐漸明顯；當礫石體積含量 70% 時，大多的礫石都直接接觸到另一個礫石，隨著斷層的抬升，單斜構造的背斜彎附近可觀察礫石在此區域旋轉並產生互鎖效應，斷層破裂跡難以突破此處，因此只發展了第一條斷層滑動面。

利用垂直位移圖與礫石旋轉分布圖判斷的三角剪切帶範圍的結果顯示，礫石體積含量愈高的礫石層，其三角剪切帶擴散的範圍愈大。

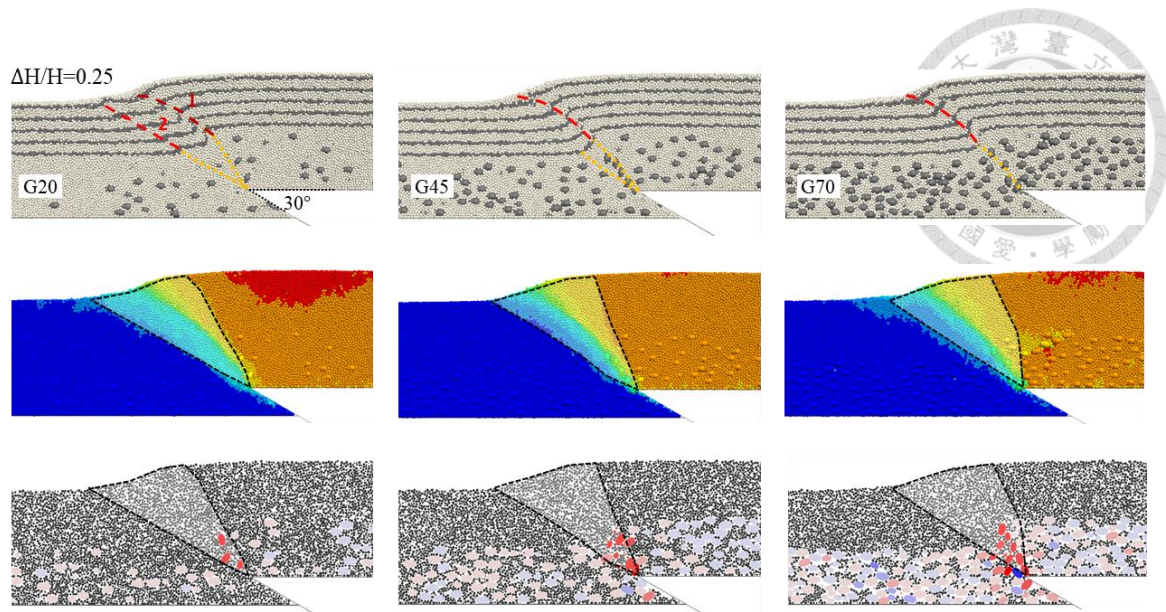


圖 4.32 不同礫石體積含量之礫石層的地層變形樣貌

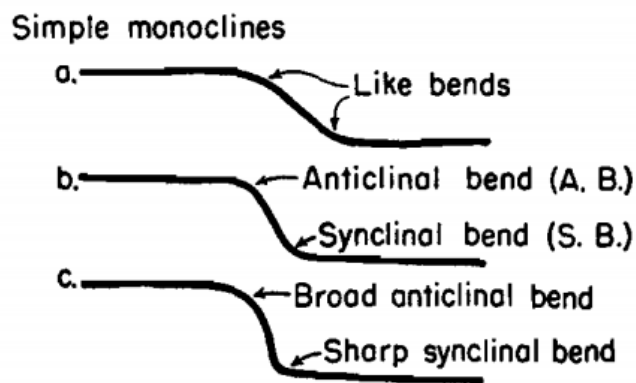


圖 4.33 單斜構造の種類 (Kelley, 1955)

比較礫石體積含量 20%與 70%的情況下，在斷層抬升各階段的地層變形如圖 4.34。抬升比為 0.1 時，兩種情境下斷層滑動面都發展到礫石層中，但是當抬升比為 0.15 時，礫石體積含量 20%的情況下，第一條斷層破裂跡已發展至地表，而礫石體積含量 70%砂箱的斷層破裂尖端還在砂層中。抬升比為 0.2 時，礫石體積含量 20%砂箱的斷層持續沿著第一條破裂跡滑動，而礫石體積含量 70%砂箱的斷層破裂尖端仍然在砂層中，但是已接近地表。抬升比=0.25 時，礫石體積含量 20%砂箱往下盤方向發展出第二條斷層滑動面，礫石體積含量 70%砂箱的第一條滑動面破裂至地表，此外，比較第一條斷層滑動面可以發現礫石體積含量較高的情況下，斷層滑動面傾角較小。



小結礫石體積含量多寡的差異，礫石體積含量較高的情況下，斷層滑動面發展距離較小，斷層錯動的能量多被用來轉動礫石，也因為如此，在礫石層中較難觀察到單一的滑動面，而是一個區域內的礫石受到擾動而持續旋轉，使得三角剪切帶範圍明顯擴大。礫石體積含量 70% 砂箱在抬升比為 0.25 時，只發展一條斷層滑動面且破裂至地表面；從上覆砂層的變形形貌來看，地層變形更接近一個單斜構造，而且背斜彎較寬。

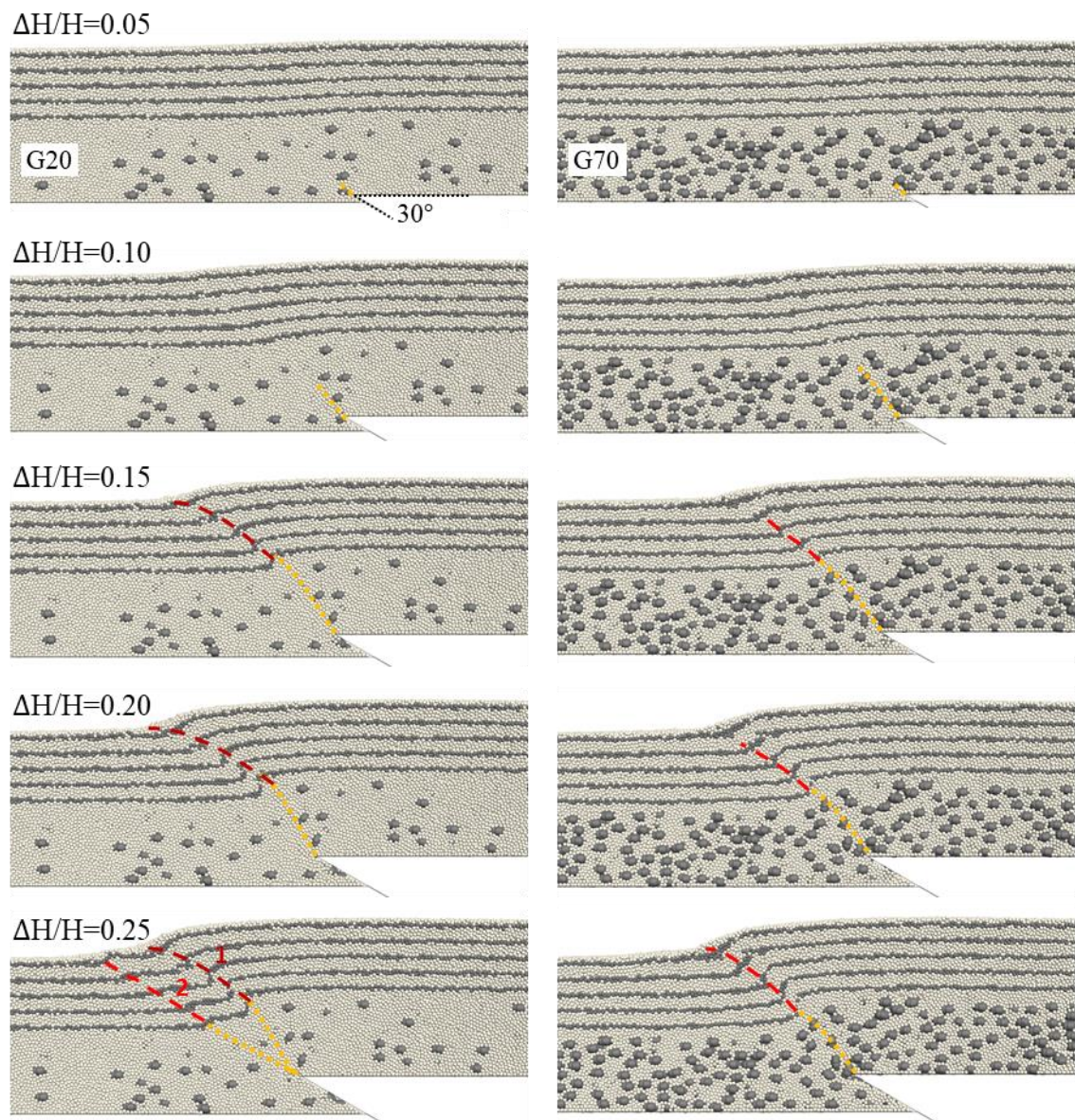


圖 4.34 礫石體積含量 20% 與 70% 的滑動面發展過程



以下討論礫石層中的單顆礫石體積相同，但長徑比分別為 1.5 : 1.5 : 1、1.7 : 1.7 : 1 與 2 : 2 : 1 的情況 (圖 4.35)。當抬升比=0.25 時，礫石長徑比為 1.5 : 1.5 : 1 的礫石層會發展出兩條斷層滑動面，第一條靠近上盤，第二條往下盤發展，且都有發展至地表；礫石長徑比為 1.7 : 1.7 : 1 的礫石層只發展出一條斷層滑動面且有發展至地表；礫石長徑比為 2 : 2 : 1 的礫石層也只發展出一條斷層滑動面但沒有發展至地表。

這三組砂箱的礫石體積含量皆為 70%，觀察上覆砂層的變形樣貌，可以發現皆形成單斜構造，只是當長徑比愈大時，單斜構造的背斜彎較寬。在不同長徑比的礫石組成之礫石層中，三角剪切帶的範圍差異不大，但礫石長徑比愈大，愈容易往上盤側影響。

小結礫石長徑比大小的差異，長徑比愈大的礫石會使斷層滑動面更難發展至地表，其造成的互鎖效應更明顯，整體礫石層較難以變形，但三角剪切帶的範圍並無明顯差異。

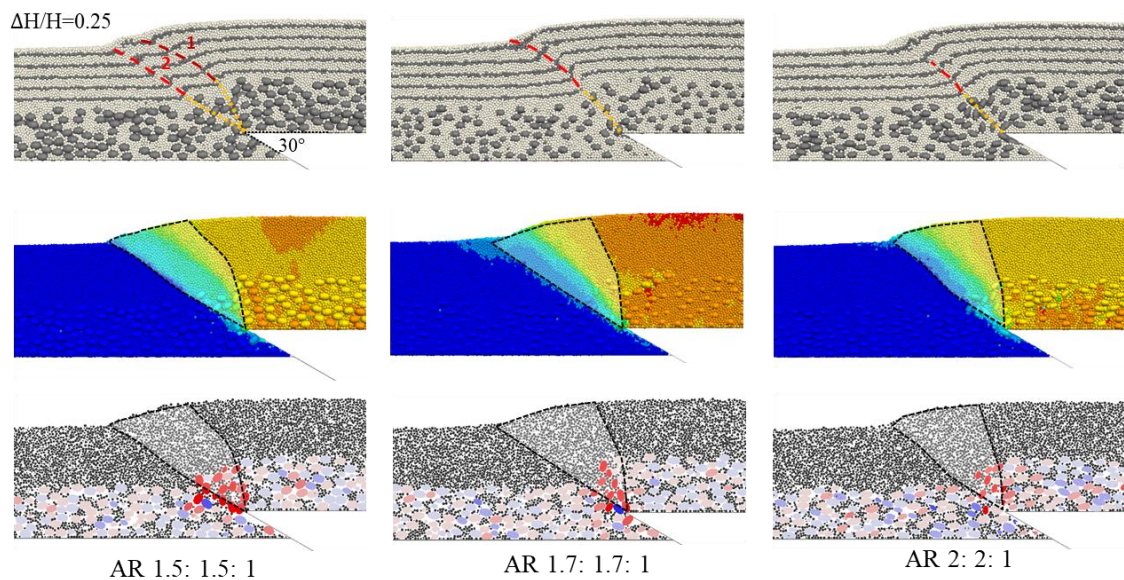



圖 4.35 不同礫石長徑比之礫石層的地層變形樣貌





水流搬運的礫石可能出現覆瓦狀構造 (Imbrication)，礫石呈現一定角度互相交疊，使得礫石的沉積角度並非平行，且礫石的平面會傾向上游。在此討論礫石初始沉積角度 $+30^\circ$ 、 $0^\circ$ 與 $-30^\circ$ 的情況，可分別代表古水流方向與逆斷層前進方向相反、古水流沒有造成覆瓦狀構造以及古水流方向與逆斷層前進方向相同的沉積環境。值得注意的是，台灣的礫石沉積環境多在西部麓山帶，東側為高山，西側為平地，逆斷層的前進方向向西，水流方向亦大致向西，故礫石沉積角度為負的情況可能較常出現。

礫石初始沉積角度 $-30^\circ$ 時，因為沉積角度與斷層傾角一致，所以斷層滑動面相較於其他兩個情況較早發展至地表，在抬升比為 0.1 時發展至地表，且斷層擴展距離最遠， $W=1.74H$ 。圖 4.36 中的礫石旋轉角度為礫石從初始狀態而受到斷層錯動後旋轉角度，礫石初始沉積角度 $+30^\circ$ 時，較多的礫石旋轉，表示礫石層中的三角剪切帶範圍最大；礫石初始沉積角度 $-30^\circ$ 的情況則反之，其三角剪切帶較小且偏向下盤。

由於野外觀察並不知道礫石受到斷層的錯動而旋轉幾度，故重新統計抬升比為 0.25 時，三角剪切帶內的礫石最終沉積角度如圖 4.37。結果顯示礫石初始沉積角度 $+30^\circ$ 的情況有許多高角度沉積的礫石；礫石初始沉積角度 $+30^\circ$ 與 $0^\circ$ 的情況下，礫石大多往正的方向旋轉，而礫石初始沉積角度 $-30^\circ$ 的情況下，礫石無固定旋轉方向，但旋轉角度約在 $\pm 30^\circ$ 內。

小結不同礫石初始沉積角度的差異，主要影響了三角剪切帶範圍與礫石受斷層錯動後的最終沉積方向。當礫石的長軸方向與斷層基盤滑動方向愈不一致時，礫石旋轉角度愈劇烈，有許多高角度沉積的礫石，且三角剪切帶愈大。

此小節探討不同地層種類、礫石體積含量、礫石長寬比與礫石排列特性之變形結果，綜合分析斷層滑動面發展情形、三角剪切帶與地表影響範圍之量化結果如表 4.2 所示。

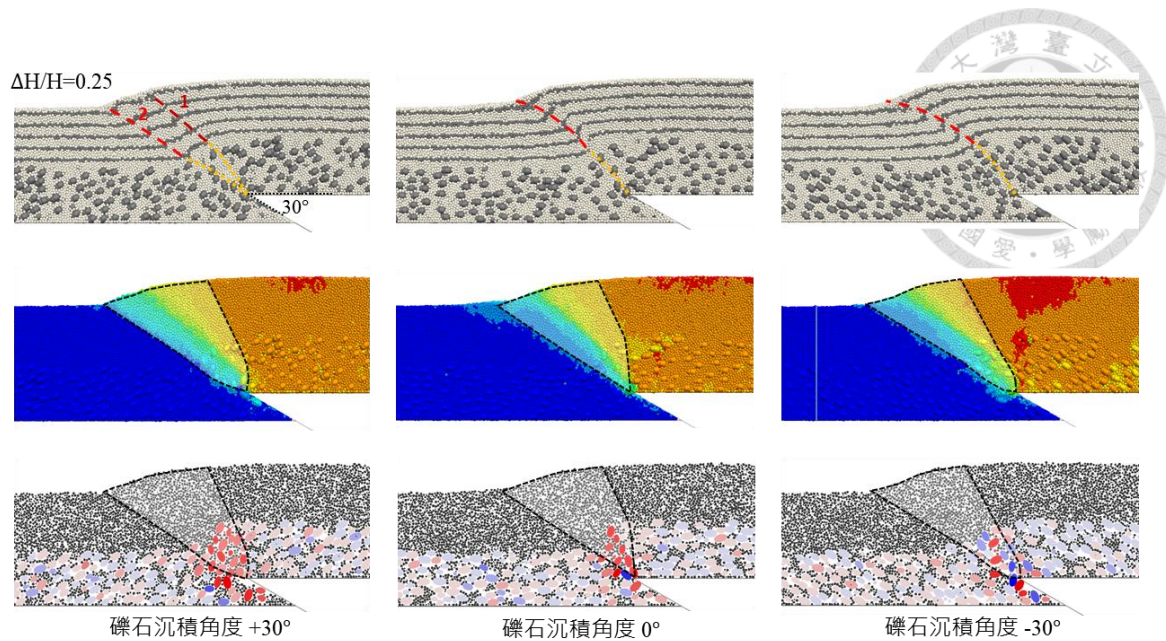


圖 4.36 不同礫石初始沉積角度之礫石層地層變形樣貌

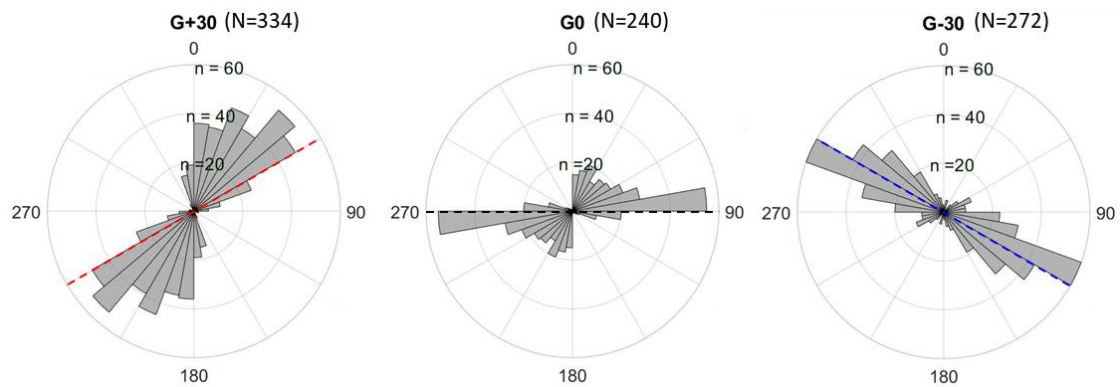


圖 4.37 三角剪切帶內的礫石最終沉積角度（虛線表示礫石初始沉積角度）

表 4.2 不同礫石組構特性之變形結果比較

	斷層滑動面情形 ( $\Delta H/H=0.25$ )		三角剪切帶 $\alpha$ (°)	地表影響範圍
	總數量	發展至地表之數量		
地層種類 ( 單一砂層、單一礫石層、礫石層 上覆砂層 1:1、砂層上覆礫石層 1:1 )	1,1,1,1	1,1,1,1	33,58,35,54	1.28H, 1.48H, 1.34H, 1.56H
礫石體積含量 ( 20%, 45%, 70% )	2,2,1	2,1,1	35,43,54	2.07H, 1.68H, 1.56H
礫石長徑比 ( 1.5:1.5:1, 1.7:1.7:1, 2:2:1 )	2,1,1	2,1,0	48,54,56	1.57H, 1.56H, 1.37H
礫石排列方向 ( +30°, 0°, -30° )	2,1,1	2,1,1	73,54,43	1.27H, 1.56H, 1.27H



## 4.5 地層應變

前述章節透過觀察顆粒相對位移與旋轉等幾何學關係，討論斷層滑動面位置與三角剪切帶的範圍；應變分布則是以運動學的角度討論地層的變形行為，是一量化分析的重要依據。

由於應力與應變量是一連續的物理量，在連續體力學中可以直接計算每一個網格的應力與應變，但 PFC<sup>3D</sup> 的基本組成是顆粒，應力與應變並不存在於單一的質點中，故必須使用進階的方法來取得這些物理量。PFC<sup>3D</sup> 量測應變的方式為設定一測量球 (measure ball) 來測量一固定半徑虛擬球體內的應變率，應變率來自測量球所包含到的每個顆粒質點的速度與位移關係，而應變率再乘上一段自定義的累計時間，即取得測量球範圍內的平均應變量值。

本研究將測量球的位置放置於砂箱中央剖面的每個顆粒的質心上，此選定的剖面長 65cm，厚 1cm，以能夠包含三角剪切帶的區域為主，測量球共有 3,345 顆。考量電腦的運算效率，設定測量球半徑 (R) 為 10mm，且隨著斷層每次垂直抬升 0.25mm 時，即更新測量球的位置 (圖 4.38)。本研究的測量球與基質顆粒半徑比值 (R/r) 為 4，扣除孔隙所占體積，每個測量球可包含 38 個基質顆粒。

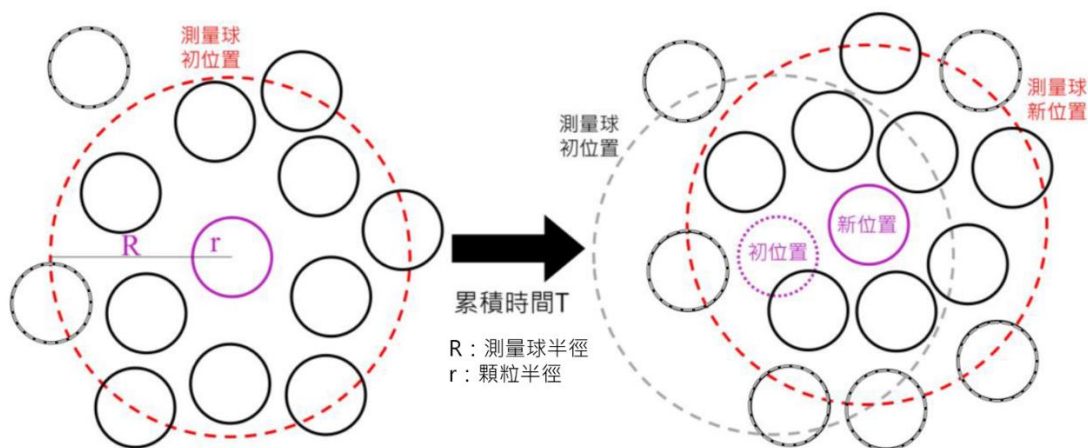


圖 4.38 更新測量球位置示意圖 (修改自柳鈞元, 2019)

以複合地層砂箱為例，抬升比為 0.1 時的應變分布如圖 4.39 所示，測量球可記錄有 6 個分量的應變 ( $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{zz}, \epsilon_{xy}, \epsilon_{yz}, \epsilon_{zx}$ )。PFC<sup>3D</sup> 中定義張力方向為正，壓



縮方向為負。觀察 $\epsilon_{xx}$ 分量，顯示地層中有一條明顯的 x 方向的壓縮量，反映了逆斷層水平擠壓的特性； $\epsilon_{zz}$ 分量有一條明顯的伸張量，分布位置與反映地層垂直膨脹的特性； $\epsilon_{zx}$ 為張量剪應變，是受到逆斷層作用的剪應變分量（ $\gamma_{zx}$ ）的 1/2 倍，可以發現負的剪應變區域位於上盤，正的剪應變區域位於下盤，此與鍾春富(2007)使用 ABAQUS<sup>2D</sup> 展示的網格變形結果相當 (圖 2. 18(b))。應用離散元素法探討剪應變區域的優勢在於可直接區分剪應變方向，且斷層尖端附近的顆粒可分離，不似有限元素法的網格變形過大而失真。然而使用離散元素法的劣勢在於運算效率較低。和先前藉由顆粒之間的相對滑動判釋斷層滑動面位置可以發現，負的剪應變區域與斷層滑動面發展情形相當，斷層滑動面的破裂尖端位置約在 $\epsilon_{zx}$ 張量剪應變到達 0.2 的時候。

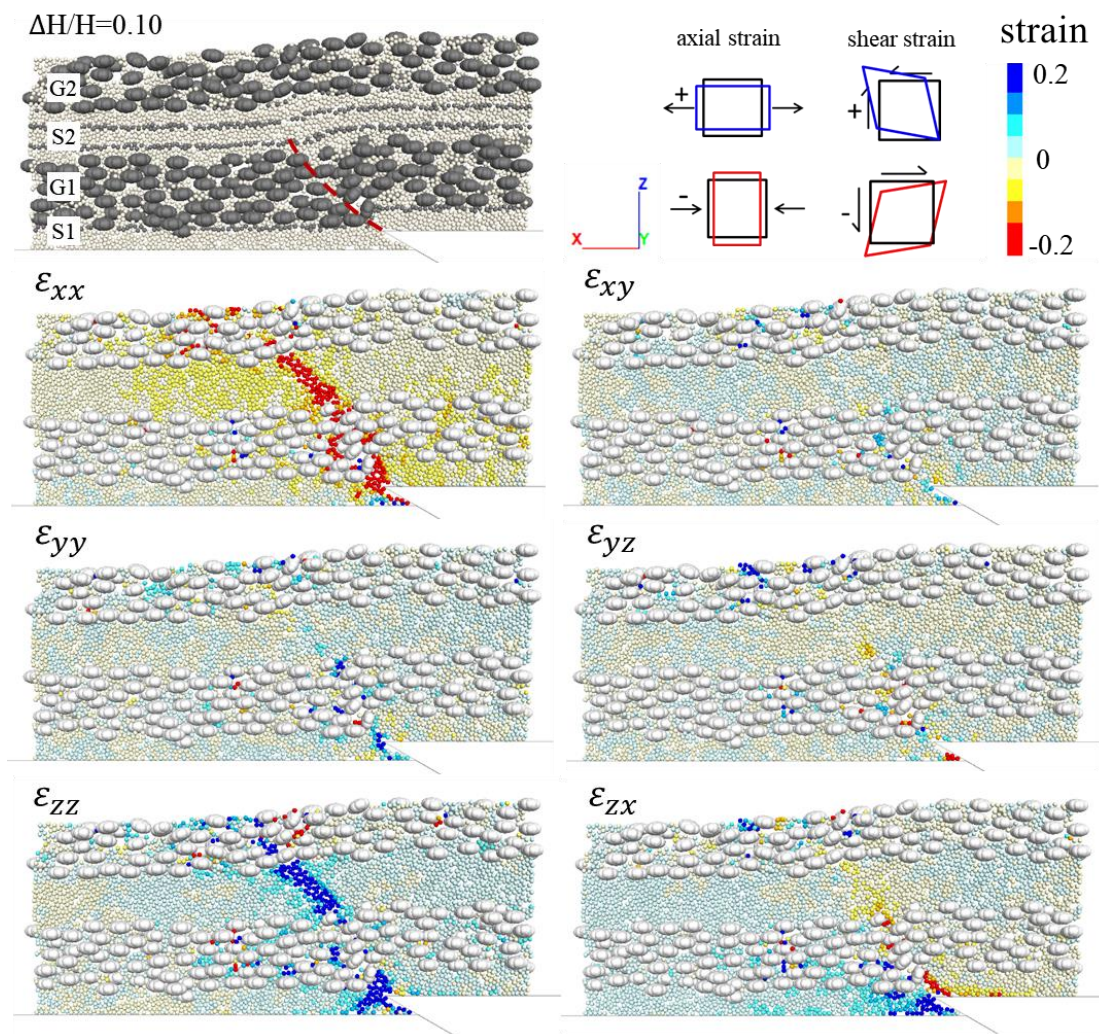


圖 4. 39 抬升比為 0.1 時的應變分布



將本研究量測之張量剪應變和 Garcia & Bray (2018) 利用 PFC<sup>3D</sup> 分析出的平面應變結果 (圖 2. 21 (i)) 比較, 可發現同樣在抬升比為 0.1 時, 地層中發生剪應變的區域相當且為一帶狀, 此帶狀的剪應變量均超過 0.2。且在斷層尖端靠近下盤的地方都有出現局部方向相反的剪應變。

圖 4. 40 說明了地層中的剪應變分布區域與礫石旋轉的區域相當, 證明了礫石旋轉的範圍可對應三角剪切帶範圍。負剪應變區域可以對應礫石的正方向旋轉量。從剪應變分布圖中也可觀察到礫石層中的應變區域較寬而砂層較窄, 證明了礫石層中的三角剪切帶較砂層大。

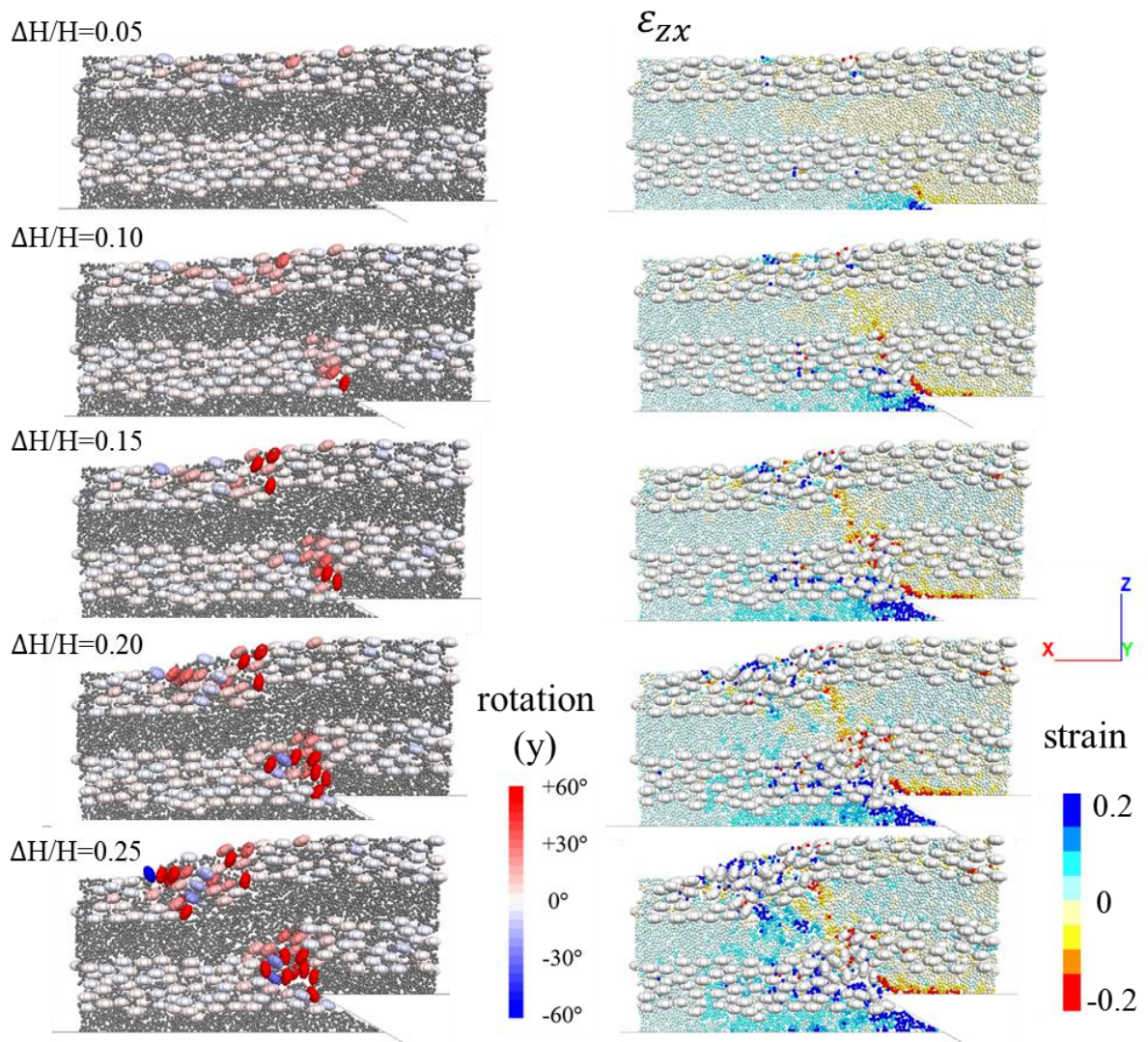


圖 4. 40 礫石旋轉量與應變分布



## 第 5 章 竹山槽溝北牆變形演育

本章節利用 PFC<sup>3D</sup> 數值分析進行全尺度模擬，由現地調查與影像辨識方法取得竹山槽溝北牆的礫石組構特性後，依照現地的地層與斷層特性設定邊界條件與初始條件，並參考過去從槽溝剖面逆推之地質事件發展順序來設定模型生成與推動過程，嘗試透過力學分析的角度，重現複合地層受多次斷層作用、生長斷層與生長地層之變形演育歷史。

### 5.1 斷層特性

竹山槽溝的上、下盤分別各有一個鑽孔，可協助解釋此區域的地質構造與斷層特性。槽溝東北方的 2 號鑽孔深度 54.3m 處鑽到了覆蓋在砂層上的卓蘭層斷層帶，從這個位置連線到竹山槽溝的剖面，判斷出車籠埔斷層的主滑動面傾角為 24 度，且與北牆觀察到的破裂跡傾角相當 (圖 5.1)。比對槽溝開挖剖面上盤的 Unit8 礫石層高程與 1 號鑽孔鑽得的礫石層高程，可推斷車籠埔斷層在歷史上總共垂直抬升了 7m，而集集地震使得地表垂直抬升 1.7m (Chen et al., 2007)。

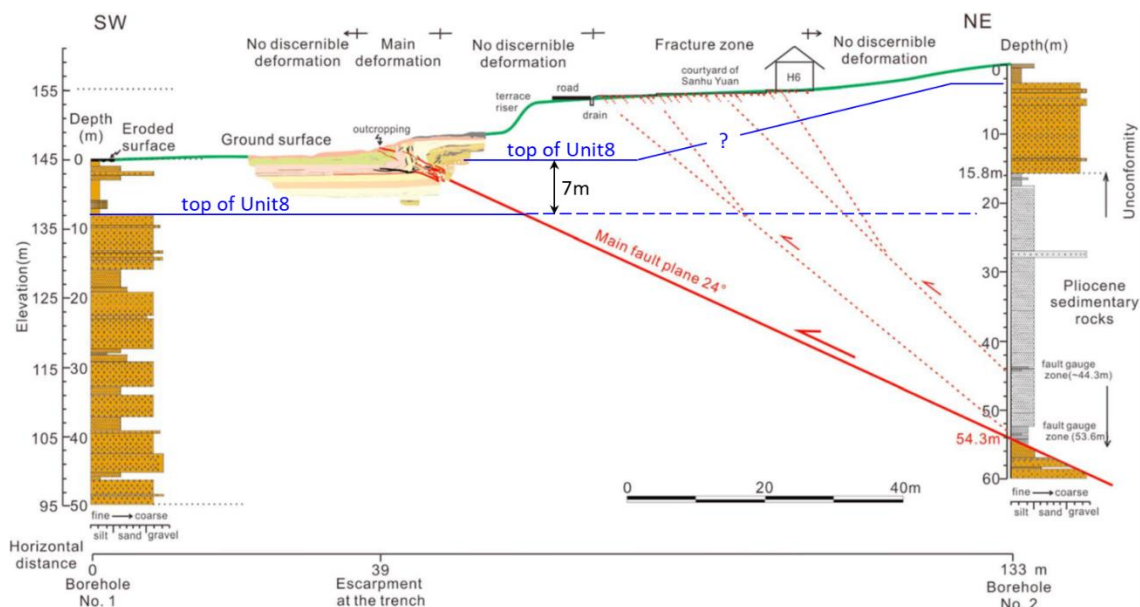


圖 5.1 集集地震引致地表變形之地質構造剖面 (修改自 Huang et al., 2016)

根據 Chen et al. (2007) 對竹山槽溝進行的古地震研究顯示車籠埔斷層在兩千年 (2ka) 內錯動過 5 次，根據碳 14 定年的結果推定的地震發生時間如圖 5.2 所

示。在竹山槽溝中記錄到的古地震事件有集集地震、E3、E2、E4 和 E5，集集地震、E2 和 E2 可從地層的疊置定律、切割關係與斷層分支來推斷出每次地震對應的垂直抬升量分別為 1.7m、0.6m 和 1.1m；然而 E4 和 E5 只能從沉積特徵推斷此兩個事件的存在，並由總垂直抬升量扣除其它古地震事件的垂直抬升量推得 E4 和 E5 總共垂直抬升了 3.6m。

每次事件的垂直抬升量為後續進行數值分析時的重要參數，每次地震事件後的地表變形都將分別進行討論。集集地震、E4 和 E5 單次地震事件的抬升比分別為 0.1、0.13 與 0.13。但若將竹山槽溝的地層總厚度最為計算基盤抬升比的分母，垂直總位移 7m 除以地層總厚度，可得知車籠埔斷層在此處的總抬升比高達 0.41。

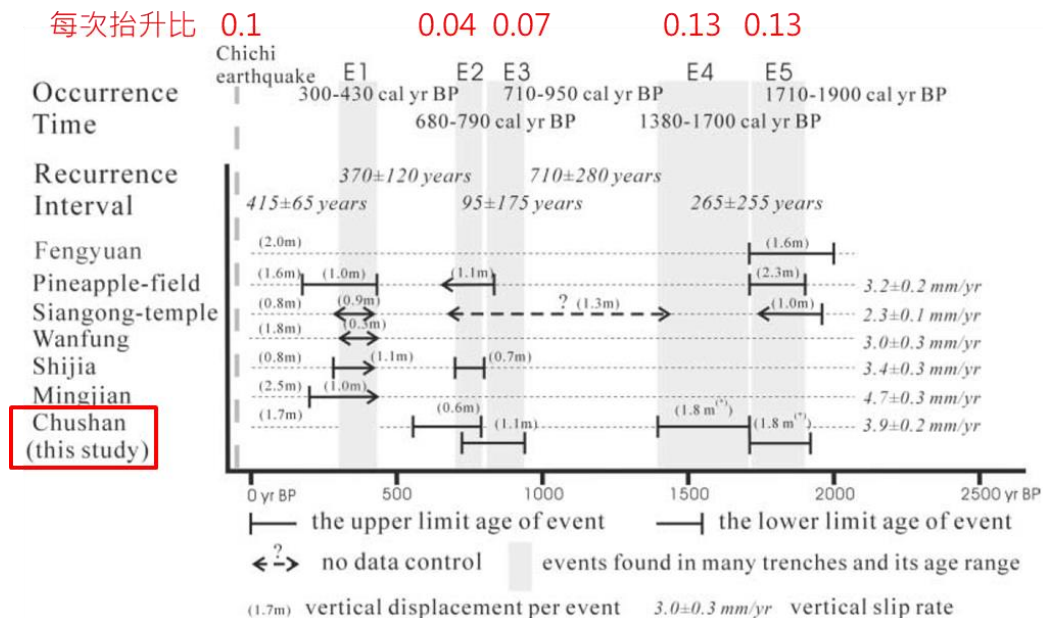


圖 5.2 車籠埔斷層的地震歷史 (修改自 Chen et al., 2007)

## 5.2 數值模型與參數

竹山槽溝實際開挖的長度為 43m、寬度為 14m，即南北牆的距離，而深度為 8m，開挖至下盤 Unit7 的頂部。本研究數值模型的設計尺寸為小尺度砂箱的 100 倍，長度 100m、寬度 20m 與高度 30m，為一全尺度模型。砂箱中的顆粒均依照長度放大 100 倍，因此顆粒的微觀參數需要調整，正向勁度與切向勁度都需要放大來至合理的範圍。



在竹山槽溝中，斷層基盤為卓蘭層，位在 Unit8 礫石層之下，為了模擬車籠埔斷層在此處反復錯動 5 次的行為，因此將斷層模型設置在最初始的條件，即基盤未曾活動過，且地震事件 E5 之前的上覆地層水平沉積。根據 2.1.2 節 Huang et al. (2016) 歸納之土壤特性，竹山槽溝中的 Unit8 為礫石層，Unit0 至 Unit7 以粉砂層為主。Unit0 至 Unit7 的地層厚度從槽溝剖面可以確定，總共厚度為 9m；而 Unit8 礫石層的下界並沒有在槽溝剖面中被確認，但可以從槽溝西南方的 1 號鑽孔得知礫石層厚度為 8m。此數值模擬的最終階段定義為集集地震之後，下盤的地層累計 Unit0 至 Unit8，厚度為 17m；上盤則因為假設在每個地震歷史事件後都有發生地層侵蝕，故最終階段的地層厚度約 11.7m。

本研究主要探討竹山槽溝北牆的變形特徵，因此後續之數值模擬將地層分成兩種顆粒型態：圓球顆粒代表粉砂層，橢球顆粒與圓球顆粒混合形成礫石層。模型尺寸與初始設定如圖 5.3 所示，斷層線與砂箱長度垂直，斷層傾角假設為  $24^\circ$ ，如同地表破裂跡正交於竹山槽溝。初始狀態為地震事件 E5 前，上覆地層有 8m 的 Unit8 礫石層，以及 5.8m 的粉砂層。

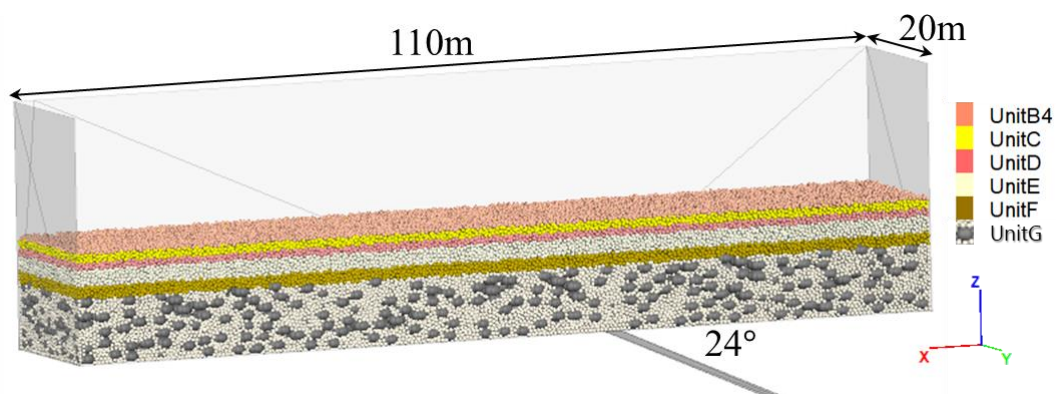


圖 5.3 模型尺寸與初始狀態

在初始狀態中，假設礫石層中的礫石為水平沉積而無覆瓦狀構造，其他礫石組構特性將由保存於車籠埔斷層地震園區的竹山槽溝北牆剝片做為參考依據，由 4.1.3 節的分析結果，設定礫石顆粒的長徑比為 1.7 進行模擬。



由於數值分析軟體中是輸入礫石的體積含量，所以必須取得礫石面積含量與礫石體積含量的關聯性。操作方式是使用數值分析中切割面的功能，在已知的礫石體積含量的砂箱中切割面，得到對應的礫石面積含量，在進行線性回歸(圖 5.4)。 $A_G$  為礫石所占面積、 $A_t$  為分析總面積、 $V_G$  為礫石在砂箱中所占體積、 $V_t$  為礫石層總體積，結果如圖 5.5 所示。竹山槽溝 Unit8 礫石層的礫石體積含量則是從面積含量反算，推得礫石體積含量為 71%。故在全尺度數值模型中，假設礫石體積含量為 70% 進行模擬。總結以上之礫石組構特性與砂箱尺度放大後的微觀參數如表 5.1。

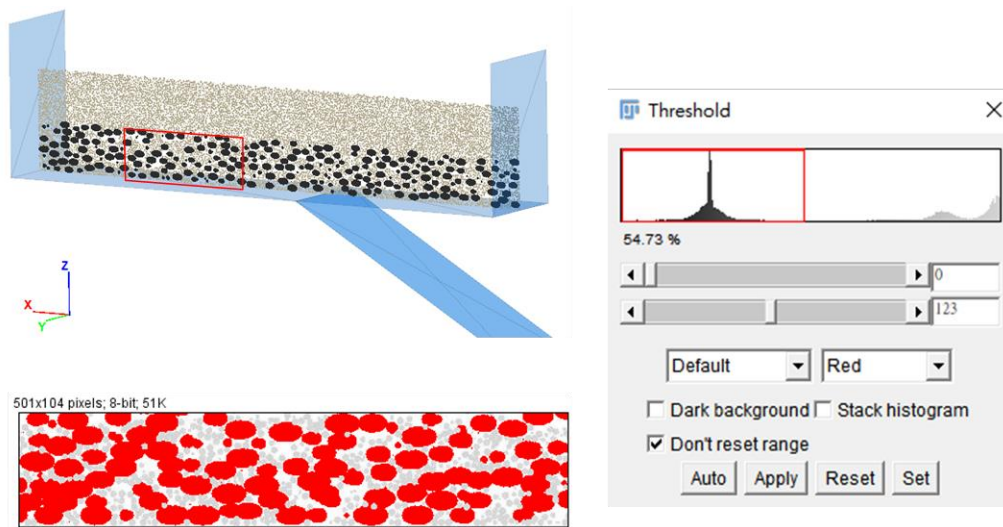


圖 5.4 礫石面積含量計算示意圖

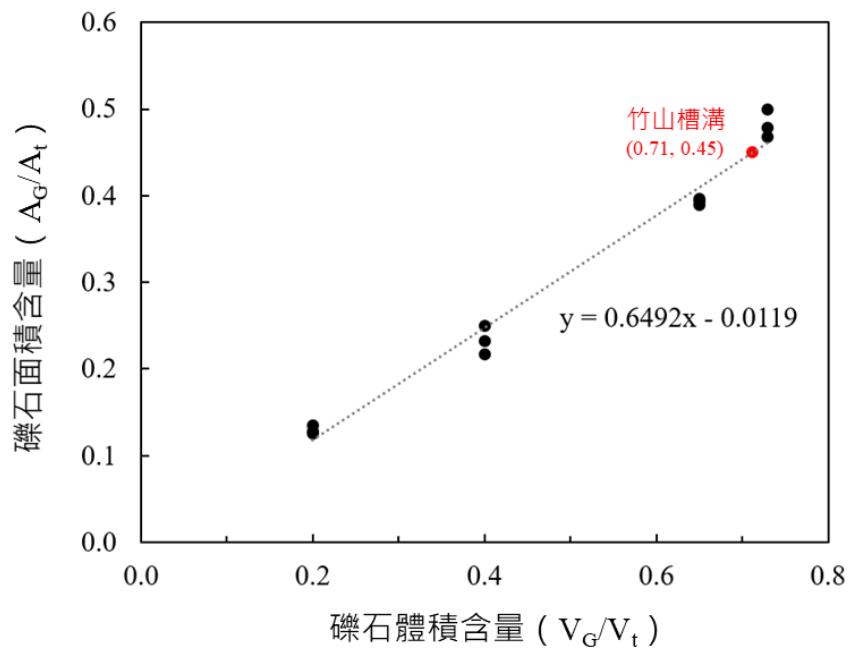


圖 5.5 礫石體積含量與礫石面積含量關係圖

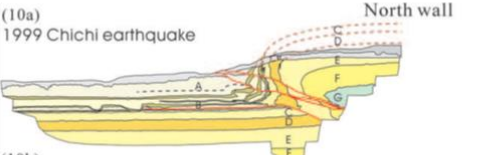
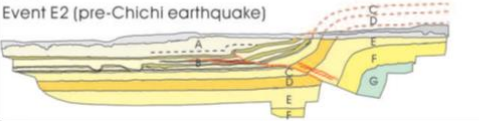
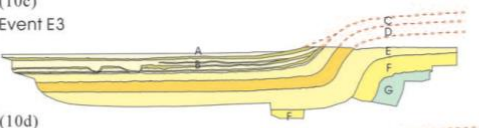
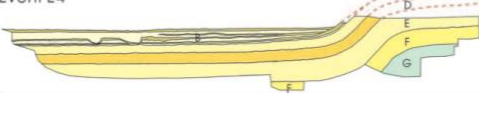
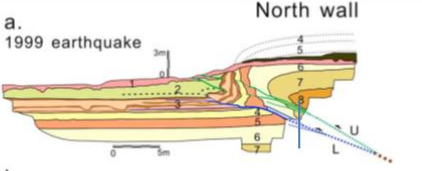
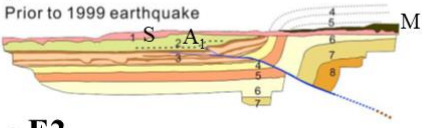
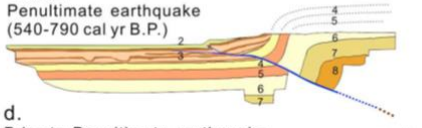
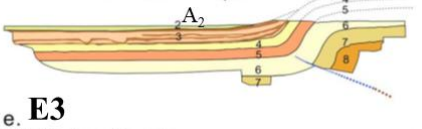
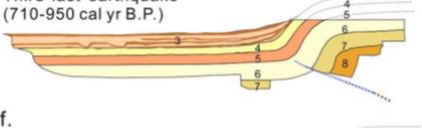
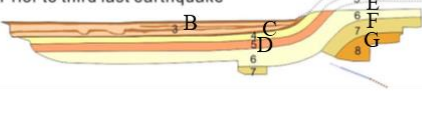
表 5.1 全尺度砂箱之微觀參數

地層		Void ratio	Particle size (cm)	Micro-material parameters		
砂層 (Ball)		0.33~0.38	Ball radius = 25	Density	2600	kg/m <sup>3</sup>
				k <sub>n</sub>	2.054e6	N/m
				k <sub>s</sub>	6.847e5	N/m
			Fric	0.577		
礫石層	基質 (Ball)	0.33~0.38	Ball radius = 25	Density	2600	kg/m <sup>3</sup>
			k <sub>n</sub>	2.054e6	N/m	
			k <sub>s</sub>	6.847e5	N/m	
			Fric	0.577		
			Clump size (2a:2b:2c) = 230:230:135 (1.7:1.7:1)	Density	2600	kg/m <sup>3</sup>
				k <sub>n</sub>	2.054e6	N/m
				k <sub>s</sub>	6.847e5	N/m
				Fric	0.577	
				V <sub>G</sub>	70	%
牆體 (Wall)				k <sub>n</sub>	3.98e8	N/m
				k <sub>s</sub>	3.98e8	N/m
				Fric	0.577	

透過離散元素法新生成顆粒、刪除顆粒與模型邊界強制位移的指令，可以模擬生長地層、地層的侵蝕作用與斷層作用，參考 [Chen et al. \(2007\)](#) 與 [Huang et al. \(2016\)](#) 對竹山槽溝的復原剖面圖，整理此處經歷的地質沉積歷史以及斷層錯動歷史如表 5.2 所示。[Chen et al. \(2007\)](#) 分析了竹山槽溝的剖面變形形貌、層位關係以及碳 14 定年資料，藉由幾何關係逆推竹山槽溝五次地震事件的變形過程。其中古地震事件 E4、E5 僅能由的古土壤的超覆構造(onlap structure)推斷，缺乏可以判斷垂直抬升量的證據，故此兩事件的變形過程並未列入復原剖面圖中。[Huang et al. \(2016\)](#) 重繪槽溝構造演育圖，將下位斷層 (lower fault) 與上位斷層 (upper fault) 區分出來，其中下位斷層是造成古地震事件 E4 中單斜構造的主因斷層，此後兩段層各有演繹。

表 5.2 槽溝北牆剖面復原圖及地質事件整理



Chen et al. ( 2007 )	Huang et al. ( 2016 )	地質事件
<p>(10a) North wall 1999 Chichi earthquake</p>  <p>(10b) Event E2 (pre-Chichi earthquake)</p>  <p>(10c) Event E3</p>  <p>(10d) Event E4</p> 	<p>a. North wall 1999 earthquake</p>  <p>b. Prior to 1999 earthquake</p>  <p>c. <b>E2</b> Penultimate earthquake (540-790 cal yr B.P.)</p>  <p>d. Prior to Penultimate earthquake</p>  <p>e. <b>E3</b> Third last earthquake (710-950 cal yr B.P.)</p>  <p>f. Prior to third last earthquake</p>  <p><b>E4、E5 ?</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 集集地震(錯動1.7m) · 破裂跡長上分支</li> <li>• UnitA<sub>1</sub>SM沉積</li> <li>• E2(錯動0.6m) · 斷層尖端至UnitB</li> <li>• UnitA<sub>2</sub>沉積</li> <li>• 侵蝕</li> <li>• E3(錯動1.1m) · 斷層尖端至UnitE</li> <li>• UnitB<sub>1</sub>沉積</li> <li>• 侵蝕</li> <li>• E4(錯動1.8m) · 斷層尖端至UnitG</li> <li>• UnitB<sub>32</sub>沉積</li> <li>• 侵蝕</li> <li>• E5(錯動1.8m)</li> <li>• UnitGFEDCB<sub>4</sub>沉積</li> </ul>



### 5.3 模擬結果

竹山槽溝北牆的數值模擬過程按照表 5.2 的地質事件分步驟進行，包括地層的生成、上盤地層侵蝕與 5 次斷層錯動。首先探討最終狀態的變形行為，觀察集集地震事件後的地表變形、斷層滑動面發展、三角剪切帶與礫石旋轉特徵，再分階段討論地層變形的過程。所有模擬結果都將與過去利用幾何關係逆推之槽溝剖面復原圖比較。

集集地震後的地層變形如圖 5.6 所示，此為砂箱之觀察面(側視圖,  $y=20\text{m}$ )，黑色線框選處對應竹山槽溝的開挖剖面。最終階段的地層已全部沉積，斷層垂直抬升量為 7m。集集地震的垂直抬升量為 1.7m，觀察的地表變形為 1.7m，在整個數值模擬斷層推動的時候，設定每 1000 個時間步伐 (timestep) 輸出一張照片，透過連續變形的結果判釋之斷層滑動面如圖 5.7 所示，第一條斷層滑動面由斷層尖端發展至 UnitE 粉砂層，主要在礫石層中發展，並未貫穿之後新沉積的地層；第二條滑動面更偏向下盤，由斷層尖端破裂至 UnitB1 粉砂層頂部；第三、四條斷層滑動面又恢復到上盤側，滑動量不明顯，因為此時的斷層尖端已經發展到礫石層的頂部，局部的礫石層轉動量很大，導致上方區域的粉砂層受擾動大，導致斷層滑動面的相對滑動量並不明顯。比對槽溝剖面復原圖，數值模擬判釋的第二條斷層滑動面可以對應槽溝剖面復原圖中的下位斷層。第三、四條斷層滑動面可以對應槽溝剖面復原圖中的上位斷層，且確實可以發現上位斷層的破裂跡有更多的分支情形。第一條斷層滑動面則無法對應，原因可能是因為第一條斷層滑動面主要在礫石層中發展，較難從地層上下盤的相對位移判釋。因此，在較難觀察到層理的礫石層中，需用其他的變形指標觀察礫石層的變形，例如礫石顆粒的旋轉情形。

觀察每一層地層的變形摺曲樣貌、垂直方向位移與礫石主要旋轉的區域判釋的三角剪切帶如圖 5.7 黑色虛線框選處所示，三角剪切帶的範圍幾乎在上盤，與槽溝剖面復原圖類似。



比較礫石的旋轉情形如圖 5.8，由於槽溝剖面復原圖中並未描繪礫石顆粒的沉積樣貌，故礫石的旋轉情形是和槽溝剝片比對。槽溝剝片所記錄到的礫石層區域為礫石層變形的前緣，實際照片如圖 5.8(d)所示，首先在拍攝的槽溝剝片照片上描繪出礫石顆粒，再利用 ArcGIS 統計長軸大於 20cm 的礫石旋轉角度（圖 5.8(e)）。在數值模型中，切砂箱中央剖面，比較礫石旋轉角度範圍如圖 5.8(b)框選處，可以發現在礫石層變形前端的區域，旋轉最劇烈，旋轉角度  $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ ，且在斷層滑動面附近可觀察到與其大致平行的礫石，與圖 5.8(e)結果相符。

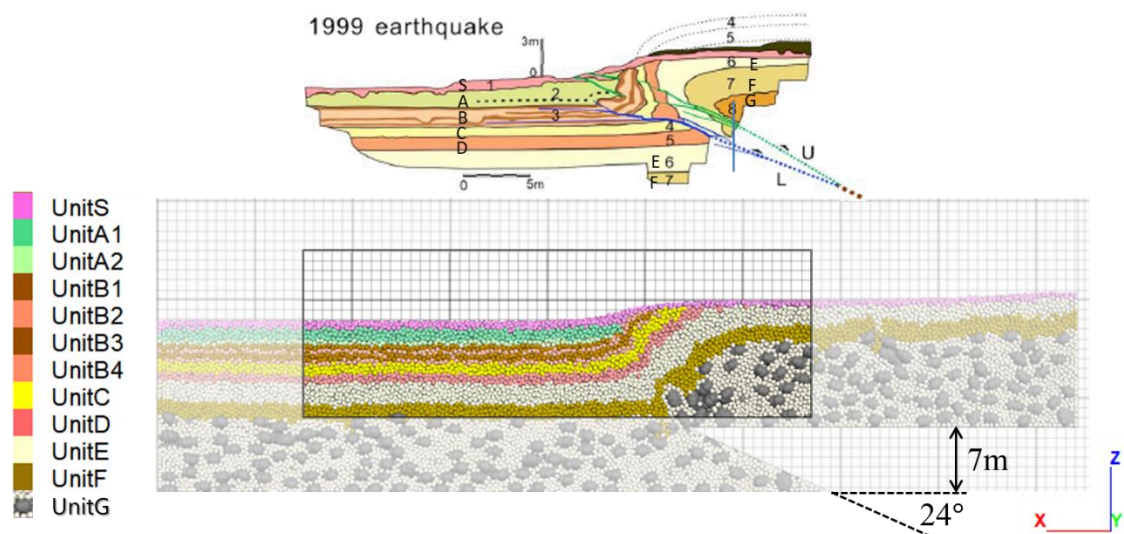


圖 5.6 集集地震後的變形結果與竹山槽溝比對圖

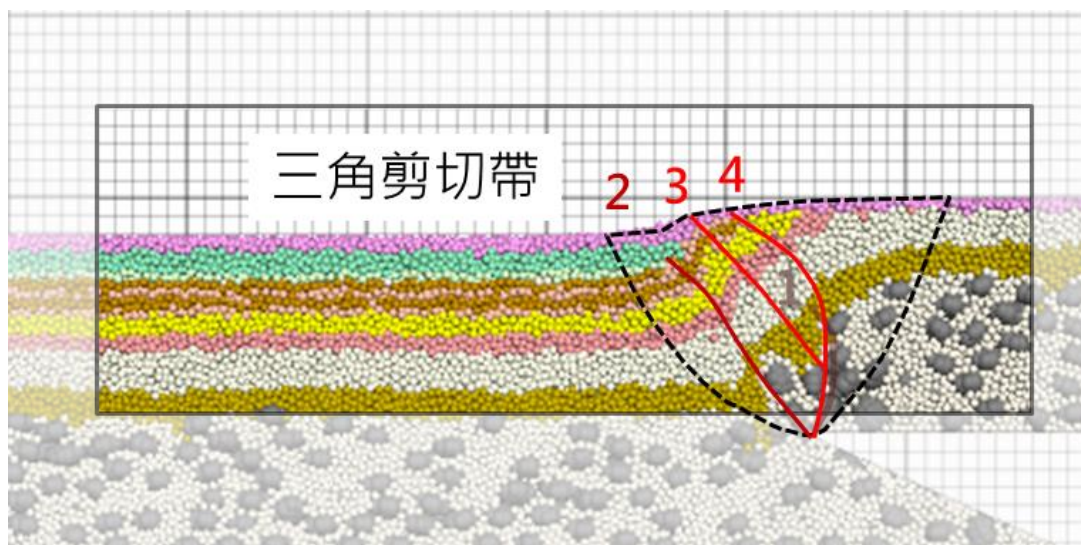


圖 5.7 三角剪切帶與斷層滑動面

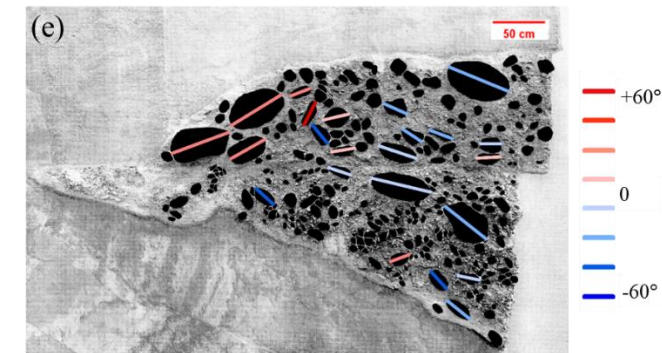
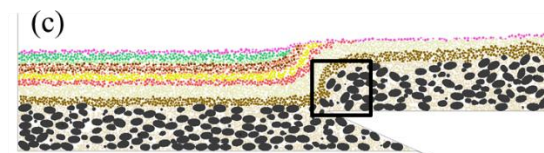
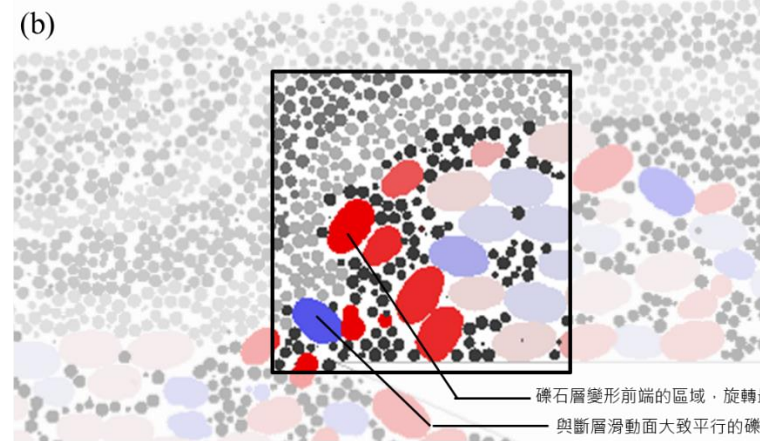
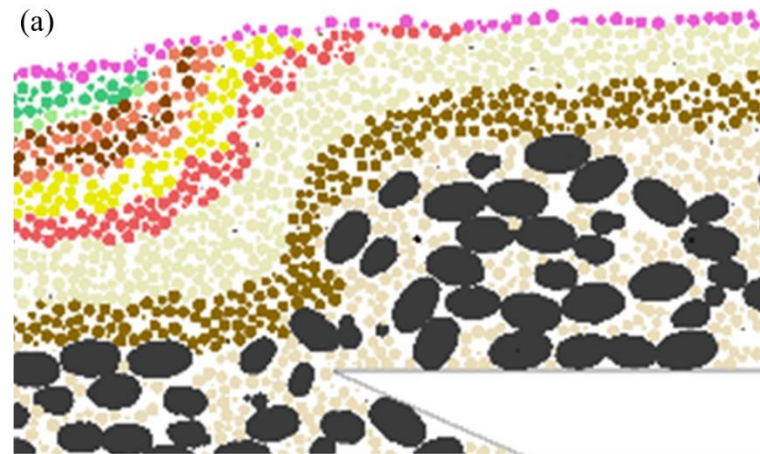


圖 5.8 礫石旋轉情形比對圖 (a)數值模型剖面(b)數值模型中的礫石旋轉角度(c)數值模型觀察位置  
(d)槽溝剝片拍攝照片(e)槽溝剝片上的礫石旋轉角度



以下開始分階段討論地層的變形過程，其中的垂直位移圖為分階段重新累積的結果。古地震事件 E5 和 E4 並未分別在槽溝復原圖被討論，因此本研究假設此時地層沉積至 UnitB<sub>2</sub>，並將古地震事件 E5 和 E4 簡化為一次斷層錯動，垂直抬升量 3.6m，此時地層厚 13.8m，即抬升比為 0.26。地層變形、垂直位移與指準層和礫石旋轉量如圖 5.9，灰色框選處大致為竹山槽溝剖面位置。此時第一條斷層滑動面（棕色線段）發展至礫石層頂部，礫石主要轉動的區域可以指示三角剪切帶的範圍，此時的礫石最大旋轉角度可達 68°。而粉砂層的變形樣貌形成一單斜構造，此觀察與第 4.4 節討論之高礫石體積含量的變形樣貌相似。

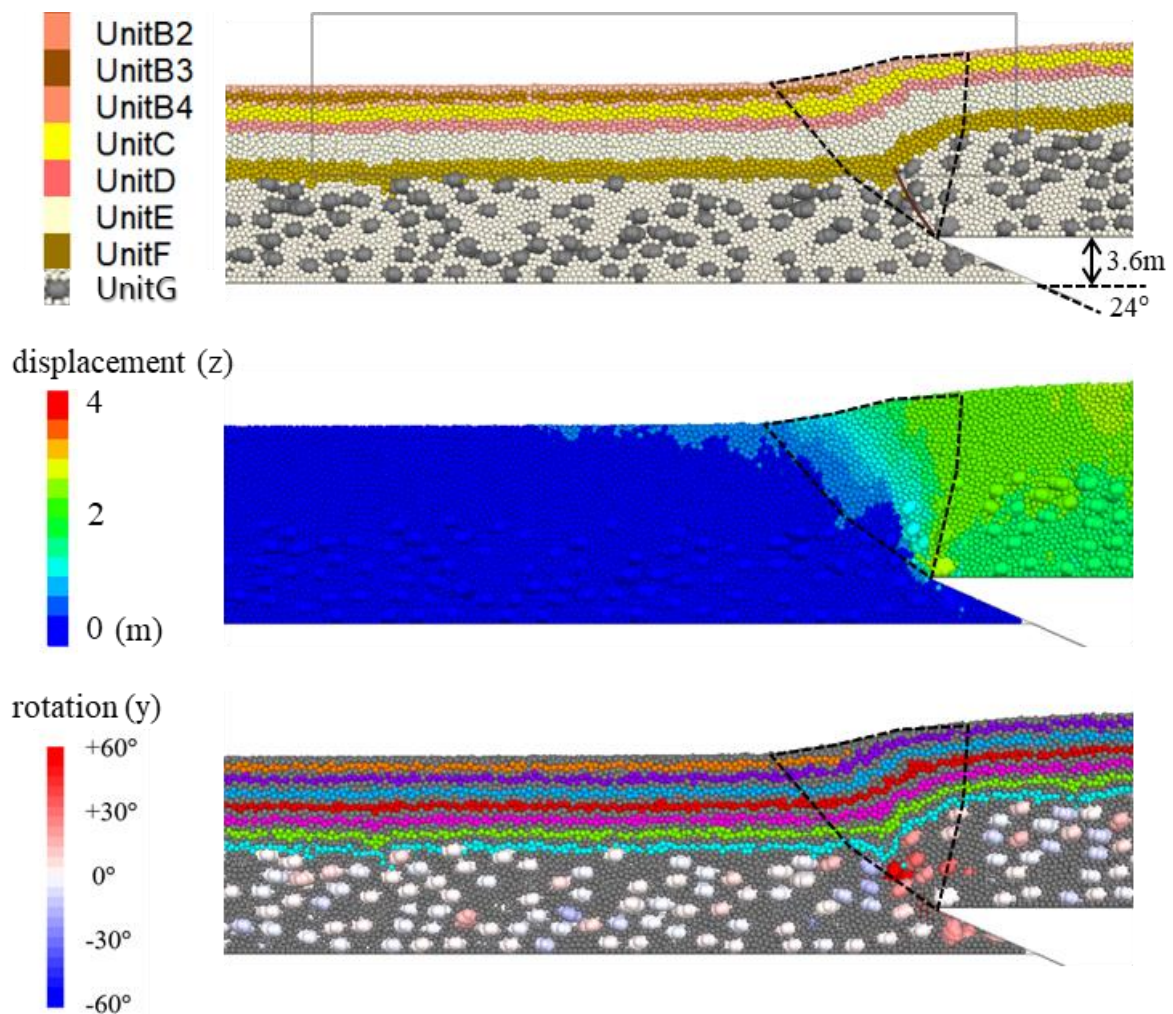


圖 5.9 地震事件 E4 後的地層變形

地震事件 E4 後歷經上盤侵蝕與 UnitB1 粉砂層沉積，接著地震事件 E3 後的地層變形如圖 5.10，本次事件產生 1.1m 垂直抬升量。此時 UnitF 粉砂層已經錯斷，因此判斷第一條斷層滑動面繼續發展至 UnitE 粉砂層，但是從後來的斷層滑動面發展推斷此滑動面並非槽溝復原圖所描繪的第一條斷層滑動面（圖 5.10 藍色虛線）。礫石主要轉動的區域同樣可以指示三角剪切帶的範圍，地震事件 E3 讓礫石層中的三角剪切帶擴大，且此時的礫石最大旋轉角度可達  $82^\circ$ 。粉砂層的變形樣貌同樣為一單斜構造，靠近斷層尖端上方的礫石持續轉動使地層發育有更寬的背斜彎。

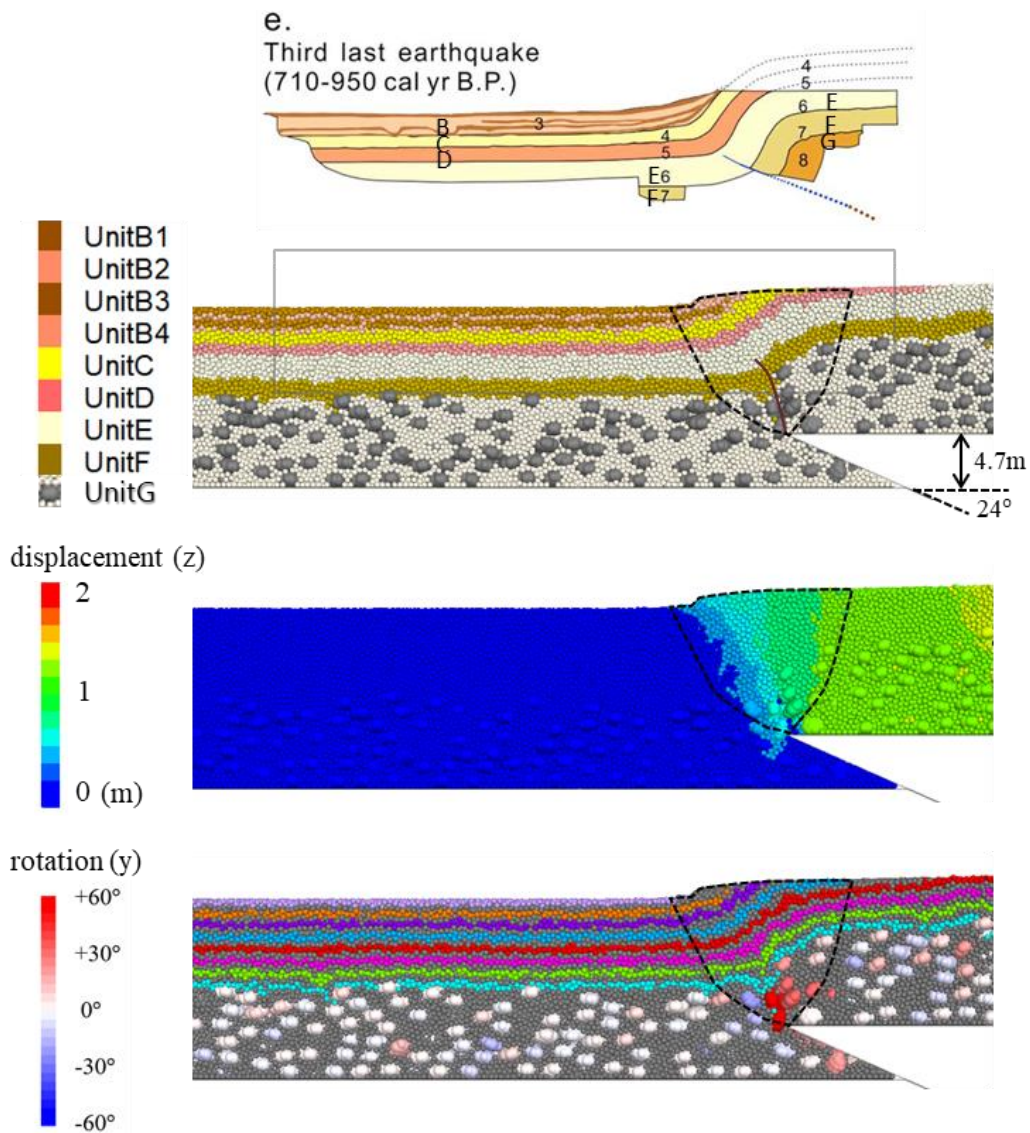


圖 5.10 地震事件 E3 後的地層變形



地震事件 E3 後歷經上盤侵蝕與 UnitA2 粉砂層沉積，接著地震事件 E2 後的地層變形如圖 5.11，本次事件產生 0.6m 垂直抬升量。此時第一條斷層滑動面停止發展，而往下盤的方向發展了第二條斷層滑動面（深紅色線段），破裂至 UnitE 粉砂層頂部，此條滑動面與槽溝復原圖判釋的第一條斷層滑動面位置相當。礫石主要轉動的區域同樣可以指示三角剪切帶的範圍，地震事件 E2 讓三角剪切帶往下盤擴大，且此時的礫石最大旋轉角度可達  $85^\circ$ 。在槽溝復原圖中推斷此時的斷層滑動面發展至 UnitB1 粉砂層，但在數值模型中，只有發現 UnitF 粉砂層明顯錯斷。

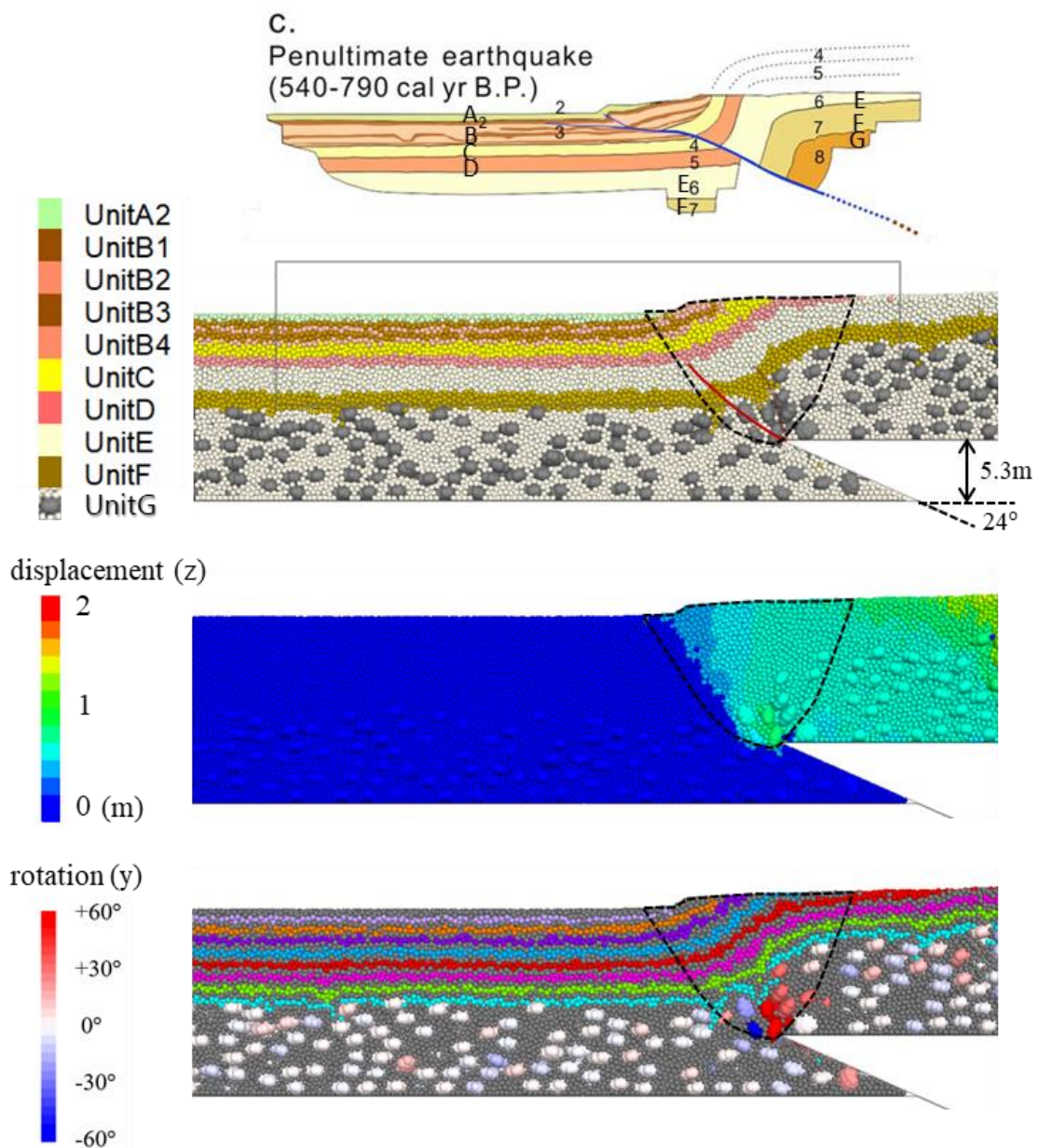


圖 5.11 地震事件 E2 後的地層變形

地震事件 E2 後歷經上盤侵蝕與 UnitA1、UnitS 粉砂層沉積，在上盤的 UnitM 回填層不計，接著集集地震後的地層變形如圖 5.12，本次事件產生 1.7m 垂直抬升量。此時第二條斷層滑動面發展至 UnitB1 粉砂層，與槽溝復原圖判釋的第一條斷層滑動面相同。第三、四條斷層滑動面（鮮紅色線段）相繼出現也都發展至地表，且它們在礫石層中的滑動面相同，進入粉砂層時才形成分支。礫石主要轉動的區域同樣可以指示三角剪切帶的範圍，集集地震讓三角剪切帶更往下盤擴大，且礫石最大旋轉角度可達  $88^\circ$ 。觀察地層變形的樣貌，UnitF 到 UnitB1 粉砂層都明顯錯斷，與實際開挖的槽溝觀察結果類似，唯實際情況觀察的斷層滑動面傾角較緩，且有錯斷 UnitA 粉砂層。

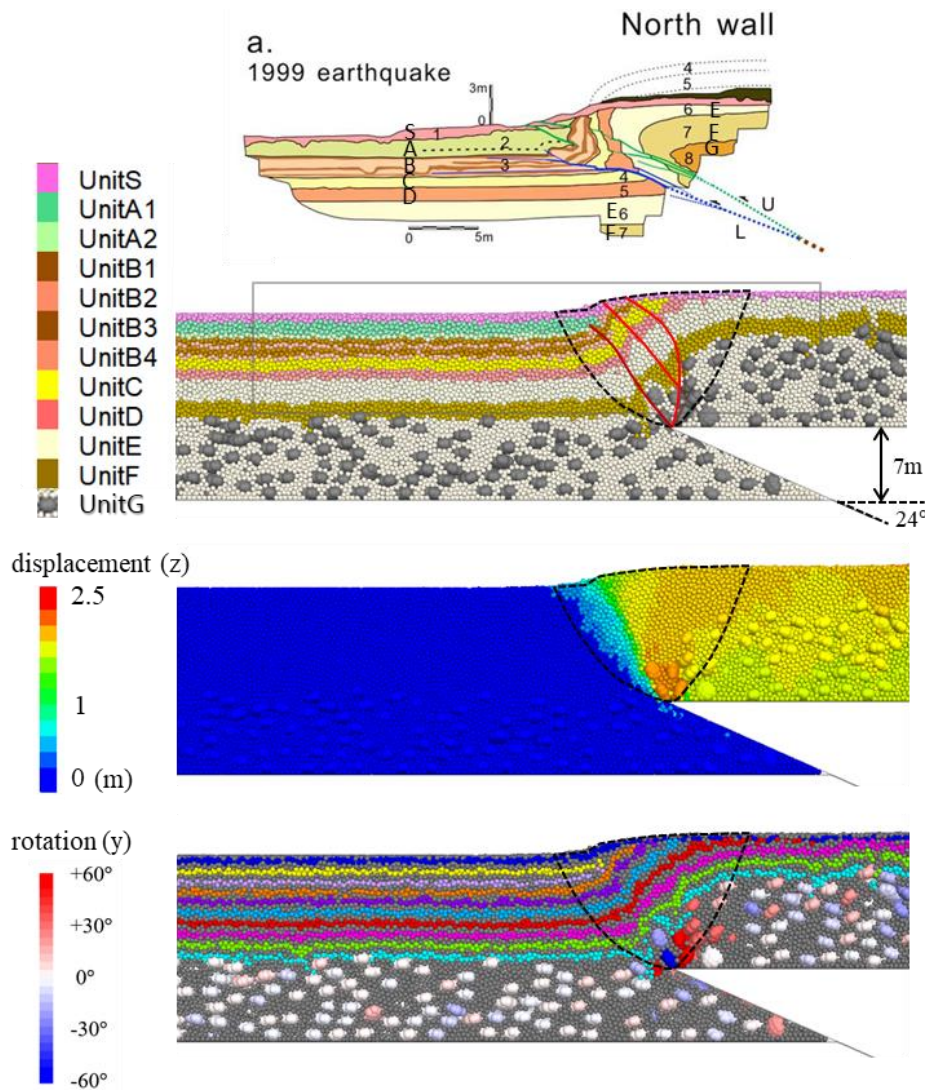


圖 5.12 集集地震後的地層變形

總結各地震事件後的地層變形結果如表 5.3 所示，比較項目包含斷層滑動面情形、三角剪切帶以及礫石最大旋轉量。累計抬升比定義為該次地震事件的垂直抬升量除以最終觀察到的地層厚度，即竹山槽溝下盤厚度 17m，用來說明隨著抬升比愈大所對應的變形結果。結果顯示隨著抬升比愈大，斷層滑動面數量愈多，最後發展出 4 條斷層滑動面，其中兩條破裂至地表；三角剪切帶的範圍亦隨著抬升比愈大而向上盤變寬；礫石最大旋轉量也持續增加，但旋轉並未超過 90°。

表 5.3 竹山槽溝各地震事件後之變形結果比較

	累計抬升比 ( $\Delta H/H$ )	斷層滑動面情形		三角剪切帶 $\alpha$ (°)	礫石最大旋轉量 (°)
		總數量	發展至地表之數量		
E4後	0.21	1	0	65	68
E3後	0.28	1	0	105	82
E2後	0.31	2	0	110	85
集集地震後	0.41	4	2	115	88

全尺度砂箱在 y 方向上（斷層走向）的地表變形樣貌大致相同，但切不同的剖面可以發現地層中的變形形貌並不太一致（圖 5.13），例如 y=10m 的剖面可以在斷層尖端上方的位置看到 Unit3~Unit7 粉砂層幾乎直立，Unit8 礫石層被捲入 Unit7 棕色粉砂層中；而 y=6m 的剖面上，斷層尖端上方的地層傾斜約 50°，Unit8 礫石層未被捲入 Unit7 粉砂層中。由第 4.4 節參數敏感度分析得知礫石的體積含量會影響到地層變形型態，當礫石體積含量較高時，能量多用來轉動礫石，使得斷層滑動面發展距離較小，而且容易形成背斜彎較寬的單斜構造。因此藉由操作數值模型切割面的功能，觀察並量測 y=6m, 8m, 10m, 12m, 14m 和 16m 剖面上的礫石含量，發現在 y=10m 和 12m 剖面上靠近斷層尖端的礫石含量確實較其他剖面高。雖然在整個數值模型中是利用同一礫石體積含量生成，但礫石在礫石層中的位置為隨機分布，因此推測在每個剖面上的礫石含量與礫石位置有些差異。因此推論局部的礫石體積含量變異可能是造成地層變形不一致的原因。



此與竹山槽溝南北牆最後演育出不同的構造型態可能有關係。由第 4.4 節參數敏感度分析得知當礫石體積含量較少時，斷層滑動面較早發育至地表，此現象符合在槽溝南北牆剖面復原圖中，南牆在古地震事件 E3 之後第一條滑動面已發展至地表，而北牆的斷層滑動面仍在地層中 (圖 5.14)，因此推測南牆剖面上的礫石體積含量可能較低。另外也證明了三維的離散元素法數值分析工具可以提供不同方向上的材料變異性，適合探討含有礫石層之複合地層受斷層錯動後的變形行為。

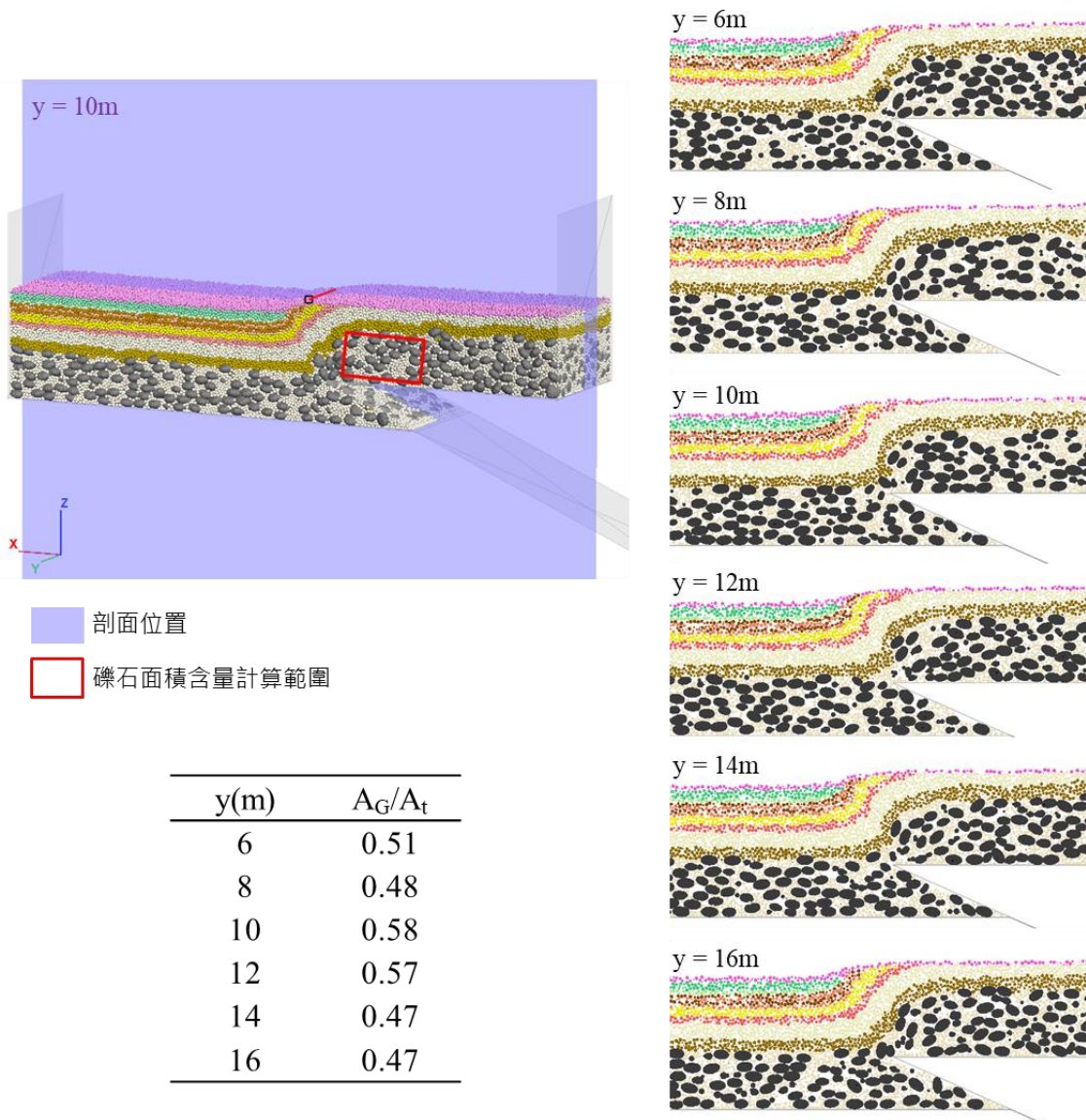


圖 5.13 不同剖面之地層變形形貌

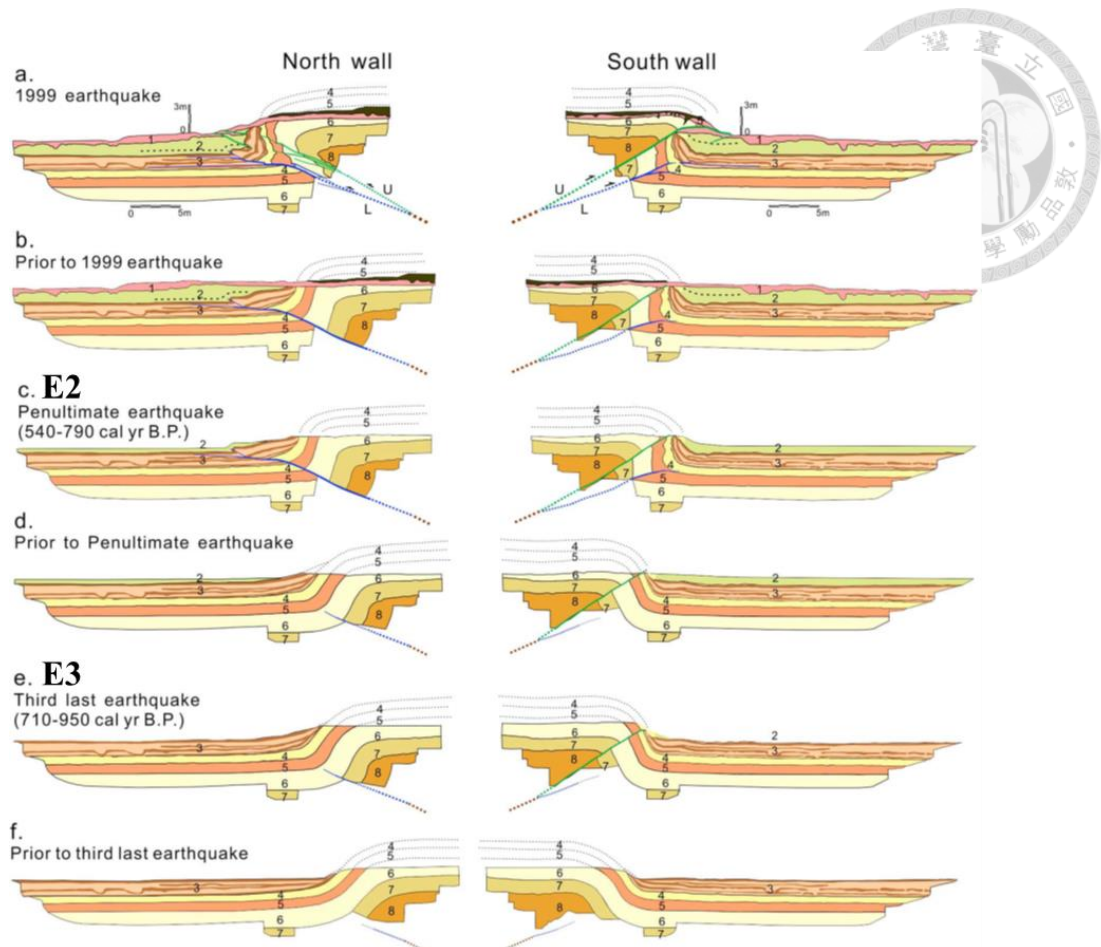



圖 5.14 槽溝南北牆剖面復原圖 (Huang et al., 2016)

## 5.4 小結

1. 透過現今仍然保存良好的槽溝剝片標本與影像自動辨識軟體來分析竹山槽溝中的礫石層組構特性，推得此處的礫石平均長徑比 1.68，礫石體積含量高達 71%。
2. 利用離散元素法建構由圓球狀顆粒與橢球狀顆粒組合而成的複合地層，可從顆粒之間的相對位移、礫石旋轉特徵觀察斷層滑動面發展、褶皺等地層變形樣貌。礫石旋轉特徵指示了三角剪切帶的範圍，模擬結果顯示三角剪切帶範圍幾乎在上盤側。
3. 利用 PFC<sup>3D</sup> 數值分析軟體可以重現竹山槽溝多次的逆斷層作用，展現離散元素分析方法模擬斷層引致之地層大變形、生長地層、地層侵蝕作用的優勢。

- 
4. 使用以顆粒力學為基礎的數值分析工具模擬的竹山槽溝北牆演育結果與利用幾何學關係逆推出的槽溝剖面復原圖相似，成功比對的項目包含斷層滑動面發展順序、地質構造演變過程與礫石層變形前緣的礫石轉動情形。
  5. 高礫石體積含量的礫石層會發育有背斜彎較寬的單斜構造，符合竹山槽溝記錄到最初兩個古地震事件後的地層變形樣貌。
  6. 在數值模型中，地層變形結果在斷層走向方向上具有變異性，局部的礫石體積含量變異可能是造成竹山槽溝南北牆最後演育出不同的構造型態的原因。






## 第 6 章 結論與建議

### 6.1 結論

本研究基於在現實世界中，斷層通過含有礫石層的複合地層的事實，以及礫石層中的礫石顆粒具有不同排列方向、不同形狀、不同尺寸的組構特性，探討礫石層組構特性對逆斷層引致複合地層變形之影響。研究方法係在物理砂箱試驗與離散元素法數值模型中加入橢球形顆粒來模擬礫石層的組構特性，透過比對兩方法學之變形結果，探討複合地層的變形行為與特徵，亦驗證數值分析的合理性。最後利用數值分析方法模擬竹山槽溝北牆受逆斷層多次錯動的變形演育，從顆粒力學的角度重現其變形過程，並再次驗證數值分析工具的可行性。綜合本研究之分析結果，獲得以下結論：

1. 單一砂層地層受逆斷層作用時，斷層滑動面發育明顯，隨著斷層不斷抬升，斷層仍持續沿著該滑動面錯動，因此三角剪切帶較集中在斷層滑動面附近；礫石層受逆斷層作用時，因為具有長徑比的礫石彼此交疊旋轉產生互鎖效應，使得斷層滑動面位置較不明顯，且三角剪切帶的範圍往上盤方向擴大。
2. 斷層擴展距離在單一砂層和複合地層中並無明顯差異，故若要評估斷層影響的程度，較適合利用透過地表變形斜率定義之地表影響範圍來判斷。含有礫石層之複合地層的地表影響範圍往上盤方向變大，但整體地表起伏的程度較緩。
3. 比較相同埋置深度而不同地層的斷層滑動面傾角可以發現斷層滑動面在砂層中較陡且發展距離較大，在礫石層中較緩而發展距離較小，此現象同樣與礫石的互鎖效應有關，因為斷層滑動面必須繞過橢球形礫石來發展，且礫石的持續旋轉消耗了更多能量。
4. 礫石層的組構特性由不同體積含量、不同排列方式與不同長徑比的橢球形礫石顆粒所控制。較高的礫石體積含量、較大的礫石長徑比使礫石層的斷



層滑動面在礫石層中的發展距離愈小。礫石體積含量愈高以及礫石的長軸方向與斷層滑動方向愈不一致的情況下會讓三角剪切帶的範圍明顯往上盤擴大，礫石排列方式也影響了礫石最後的沉積方向，當礫石的長軸方向與斷層滑動方向愈不一致時，礫石旋轉角度愈劇烈，有更多高角度沉積的礫石。

5. 在物理砂箱試驗中，觀察受斷層錯動而旋轉的礫石的分布位置，可以發現它們都在一以斷層尖端為頂點，向地表發展的三角形範圍內；在數值分析模擬中，比對礫石顆粒旋轉的範圍與地層應變的範圍一致，顯示礫石的轉動特徵指示了三角剪切帶範圍。隨著基盤抬升比愈高，礫石旋轉的範圍往下盤擴大，旋轉角度持續增加。當抬升比達 0.25 時，最大礫石旋轉角度大約為 90°。
6. 在砂層與礫石層互層之複合地層受逆斷層作用的試驗中，較深層的礫石層（G1）相較於較淺層的礫石層（G2）有更大的旋轉角度，但有礫石旋轉的範圍較小，反映了三角剪切帶是向上擴散發展。且藉此結果推測新城斷層篤行營區 1 號槽溝之上盤礫石層應對比下盤較深處的礫石層。
7. 利用三維離散元素法數值分析工具模擬竹山槽溝北牆的變形演育，斷層滑動面發展順序、地質構造演變過程、礫石層變形前緣的礫石轉動情形、生長斷層與地層侵蝕作用可被合理重現。由先前敏感度分析得知高礫石體積含量的礫石層會發育有背斜彎較寬的單斜構造，符合竹山槽溝記錄到最初兩個古地震事件後的地層變形樣貌。



## 6.2 建議

1. 本研究僅探討含有礫石層之複合地層受斷層作用的結果，唯一自由場的模擬，但現實世界中的斷層帶附近有建築物、地中結構物的存在，且以不同角度或方向建設於斷層帶中，因此其與地層材料的互制關係仍待持續研究。
2. 本研究探討的斷層形式為單純在傾向滑動之逆斷層，忽略含有平移分量時的三維效應，有賴於更多的三維模型模擬，才能更接近真實狀況。
3. 在現地調查礫石之組構特性（礫石粒形、礫石含量與礫石排列方向）時，先了解該礫石層的沉積環境有助於推測與應證野外觀察的結果。若要判斷礫石是否有固定的排列方向，應該要大範圍的觀察礫石的沉積樣貌。
4. 本研究僅探討礫石層之礫石顆粒組構特性，但影響礫石層的強度與變形因素還包含基質成分與特性，在數值模擬中可嘗試加入鍵結來模擬具有凝聚力的基質。
5. 本研究在數值分析軟體中模擬地層的特性時，尚未加入鍵結討論凝聚力之影響，實際地層的力學參數與微觀參數的關係有待探討。
6. 由於電腦的運算效能有限，數值分析軟體中模擬的礫石層礫石顆粒、土層顆粒仍比真實的情況大的多，未來可將三角剪切帶中的顆粒粒徑局部縮小，以探討更細微的變形行為。



## 參考文獻



- 王文祥 (1999)，臺灣西部台地礫石層組織、剪力強度與邊坡穩定關係之研究，國立臺灣大學地質學研究所博士論文。
- 王景平 (2002)，地表單斜褶皺與盲斷層之幾何關係探討，國立臺灣大學土木工程學研究所，碩士論文。
- 朱傲祖、梁勝雄、李建成、陳建良 (2012)，湖口斷層新釋：上盤活動背衝斷層之新發現及露頭構造分析，經濟部中央地質調查所特刊，第二十六號，第 31-51 頁。
- 李健宏、詹佩臻、吳亮均、林銘郎 (2018)，跨斷層國道三號田寮 3 號橋與中寮隧道北口段變形機制，中國土木水利工程學會，第 30 期，第 17-28 頁。
- 李健宏 (2019)，跨活動斷層橋梁基礎互制行為研究，國立臺灣大學土木工程學研究所，博士論文。
- 林銘郎、鄭富書、王鴻基、王景平、鍾春富、張芳銘、蔡維哲、許永欣、黃俊傑 (2004)，台北斷層引致之上覆土層變形及其對潛盾隧道之影響，嚴慶齡工業研究中心研究報告，亞新工程顧問公司委託。
- 柳鈞元 (2019)，斜移斷層錯動引致上覆土層同震變形行為及對淺基礎結構物之影響，國立臺灣大學土木工程學研究所，碩士論文。
- 徐家祥 (2016)，藉離散元素法探討竹山槽溝中斷層引致褶皺之構造演育，國立中央大學應用地質研究所，碩士論文。
- 翁培軒 (2016)，平移斷層錯動引致凝聚性覆土地表變形與淺基礎變位特性探討，國立臺灣大學土木工程學研究所，碩士論文。
- 陳文山、劉力豪、顏一勤、楊小青、李龍昇、游能悌、張徽正、石瑞銓、陳于高、李元希、林偉雄、石同生、盧詩丁 (2003)，新城斷層的古地震研究，經濟部中央地質調查所特刊，第十四號，第 11-24 頁。
- 陳修、顧承宇、陳錦清 (1995)，不連續變形分析法模擬卵礫石開挖行為之研究，



- 國際卵礫石層地下工程研討會，第 31-39 頁。
- 張光宗、陳宥序、鄭敏杰 (2014)，以數值方法探討卵礫石層的力學行為，*中華水土保持學報*，第 45 卷，第 2 期，第 95-102 頁。
- 張有毅 (2013)，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研究所，博士論文。
- 梁勝雄、陳建良 (2016)，臺灣中部地景四驚奇，*科學研習*，第 55 卷，第 4 期，第 48-57 頁。
- 經濟部中央地質調查所 (2012)，2012 年版台灣活動斷層分佈圖，中央地質調查所特刊，第二十六號。
- 褚炳麟 (1982)，台灣地區麓山帶與台地礫石材料性質初步研究，*土木水利季刊*，第 9 卷，第 2 期，第 73-86 頁。
- 褚炳麟、潘進明、張國雄 (1996)，台灣西部卵礫石層現地之大地工程性質，*地工技術*，第 55 期，第 47-58 頁。
- 褚炳麟、孫漢豪 (2014)，臺灣西部卵礫石層大地工程性質研究之回顧與展望，*台灣岩盤工程研討會*。
- 蔡明欣、陳錦清、王銘德 (1995)，台灣西部地區卵礫石層現地抗剪強度研究，*國際卵礫石層地下工程研討會*，第 21-30 頁。
- 賴兆偉 (2018)，加勁基礎受正斷層作用之物理模型試驗研究，國立臺灣科技大學營建工程系，碩士論文。
- 鍾春富 (2007)，逆斷層錯動引致上覆土層變形行為及對結構物影響之研究，國立臺灣大學土木工程學研究所，博士論文。
- Agisoft PhotoScan Professional (Version 1.2.5) (Software). (2016). Retrieved from <http://www.agisoft.com/downloads/installer/>
- Allmendinger, R. W. (1998). Inverse and forward numerical modeling of trishear fault-propagation folds. *Tectonics*, 17(4), 640-656.
- Avar, B. B., & Hudyma, N. W. (2019). Earthquake surface rupture: A brief survey on interdisciplinary research and practice from Geology to Geotechnical Engineering.

*Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52(12), 5259-5281.

Bray, J. D., Seed, R. B., & Seed, H. B. (1993). 1 g small-scale modelling of saturated cohesive soils. *Geotechnical Testing Journal*, 16(1), 46-53.

Bray, J. D., Seed, R. B., Cluff, L. S., & Seed, H. B. (1994). Earthquake fault rupture propagation through soil. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(3), 543-561.

Chang, K. T., & Cheng, M. C. (2014). Estimation of the shear strength of gravel deposits based on field investigated geological factors. *Engineering Geology*, 171, 70-80.

Chang, Y. L., Chu, B. L., & Lin, S. S. (2003). Numerical simulation of gravel deposits using multi-circle granule model. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 26(5), 681-694.

Chang, K. T., Kang, Y. M., Ge, L., & Cheng, M. C. (2015). Mechanical properties of gravel deposits evaluated by nonconventional methods. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(11), 04015032.

Chen, W. S., Yang, C. C., Yen, I. C., Lee, L. S., Lee, K. J., Yang, H. C., ... & Shih, T. S. (2007). 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.

Chu, B. L., Jou, Y. W., & Weng, M. C. (2010). A constitutive model for gravelly soils considering shear-induced volumetric deformation. *Canadian Geotechnical Journal*, 47(6), 662-673.

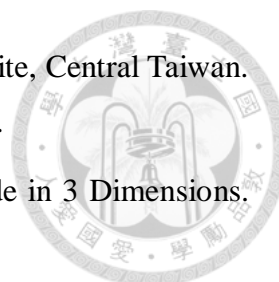
Cole Jr, D. A., & Lade, P. V. (1984). Influence zones in alluvium over dip-slip faults. *Journal of Geotechnical Engineering*, 110(5), 599-615.

Erslev, E. A. (1991). Trishear fault-propagation folding. *Geology*, 19(6), 617-620.

Garcia, F. E., & Bray, J. D. (2018). Distinct element simulations of earthquake fault rupture through materials of varying density. *Soils and Foundations*, 58(4), 986-1000.

Garcia, F. E., & Bray, J. D. (2018). Distinct element simulations of shear rupture in dilatant granular media. *International Journal of Geomechanics*, 18(9), 04018111.

Huang, W. J., Chen, W. S., Lee, Y. H., Yang, C. C., Lin, M. L., Chiang, C. S., ... & Lu, S. T. (2016). Insights from heterogeneous structures of the 1999 Mw 7.6 Chi-Chi

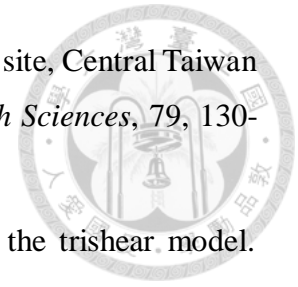


- earthquake thrust termination in and near Chushan excavation site, Central Taiwan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(1), 339-364.
- Itasca, Consulting Group INC. 2014. PFC3D 5.0 Particle Flow Code in 3 Dimensions. User's Guide, Minneapolis.
- Kelley, V. C. (1955). Monoclines of the Colorado Plateau. *Geological Society of America Bulletin*, 66(7), 789-804.
- Kelson, K. I., Kang, K. H., Page, W. D., Lee, C. T., & Cluff, L. S. (2001). Representative styles of deformation along the Chelungpu fault from the 1999 Chi-Chi (Taiwan) earthquake: geomorphic characteristics and responses of man-made structures. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(5), 930-952.
- Kübler, S., Friedrich, A. M., Gold, R. D., & Strecker, M. R. (2018). Historical coseismic surface deformation of fluvial gravel deposits, Schafberg fault, Lower Rhine Graben, Germany. *International Journal of Earth Sciences*, 107(2), 571-585.
- Li, C. H., Lin, M. L., & Huang, W. C. (2019). Interaction between pile groups and thrust faults in a physical sandbox and numerical analysis. *Engineering Geology*, 252, 65-77.
- Lin, M. L., Chung, C. F. and Jeng, F. S. (2006). Deformation of overburden soil induced by thrust fault slip. *Engineering Geology*, 88, 70-89.
- Lin, S. Y., Lin, P. S., Luo, H. S., & Juang, C. H. (2000). Shear modulus and damping ratio characteristics of gravelly deposits. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(3), 638-651.
- Mortazavi Zanjani, M., & Soroush, A. (2019). Numerical modelling of fault rupture propagation through layered sands. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 23(9), 1139-1155.
- Tali, N., Lashkaripour, G. R., Moghadas, N. H., & Ghalandarzadeh, A. (2019). Centrifuge modeling of reverse fault rupture propagation through single-layered and stratified soil. *Engineering Geology*, 249, 273-289.
- Woo, S. M., Guo, W. S., Yu, K., & Moh, Z. C. (1982). Engineering problems of gravel deposits in Taiwan. *In Engineering and Construction in Tropical and Residual Soils*, 500-518, ASCE.
- Yang, Y. R., Hu, J. C., & Lin, M. L. (2014). 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.

Zehnder, A. T., & Allmendinger, R. W. (2000). Velocity field for the trishear model. *Journal of Structural Geology*, 22(8), 1009-1014.





## 附錄 A

編號	提問 委員	問題	回覆情形
1	黃文昭 教授	研究中有探討礫石與基質比例，但是否考量基質可能會有的凝聚力？現地礫石層是否有凝聚力？	根據台灣不同區域之礫石層現地直剪試驗的結果可得礫石層可具有凝聚力 0~84kPa，摩擦角在 30°~50°之間。本研究藉由橢球形的礫石顆粒探討礫石的組構特性，可以反映礫石層的摩擦特性與互鎖效應，而尚未考慮礫石層之基質凝聚力。
2	黃文昭 教授	為何研究中之複合地層物理砂箱試驗選擇的配置為不同厚度之砂層與礫石層互層，而不是厚度 1:1 的砂層與礫石層？	本研究之動機之一為觀察到篤行營區 1 號槽溝之開挖剖面具有不同厚度的礫石層與砂層互層，且發現礫石長軸呈現不同方向的排列，但是斷層上下盤的地層無法對比。因此研究目標除了想要了解礫石層的變形行為，也想要透過不同深度之礫石旋轉特徵來推測槽溝的演育（上盤礫石層對應的下盤礫石層），故物理試驗參考篤行營區 1 號槽溝的配置（圖 2.5），提供基本物理現象觀察與初步定量分析。
3	黃文昭 教授	小尺度數值分析中的球顆粒勁度 $k_n$ 與 $k_s$ 偏小的原因？	數值分析中的球顆粒勁度與球顆粒大小有關，本研究使用之球顆粒勁度是物理砂箱試驗擬合（地表變形、斷層滑動面發展）的結果，每次測試時固定勁度比，並調整勁度大小約為初始值的正負 3 倍。球顆粒勁度愈大，斷層擴展距離越遠，地表斷層崖愈陡（李健宏，2019），本研究的測試結果亦是如此。
4	黃文昭 教授	論文圖 4.18 之地表變形結果發現物理試驗的變形趨勢為下凹，但數值模擬為上凸，如何說明此結果？	由於數值模擬中使用的基質顆粒半徑約為物理砂箱試驗中使用的基質顆粒半徑的 2.6 倍（2.5mm/0.98mm），導致在數值模擬分析中的礫石層受到擾動時，基質較不容易填滿孔隙，剪脹行為明顯，因此地表變形上凸。

編號	提問委員	問題	回覆情形
5	楊國鑫教授	建議展示標準石英砂之粒徑分布。	感謝委員的建議，參考賴兆偉(2018)的分析結果，補充至圖 3.6。
6	楊國鑫教授	覆土壓力是否會影響礫石的旋轉量？	本研究有探討不同深度之礫石層旋轉量，但因為礫石的旋轉量與礫石和斷層尖端又有關係(三角剪切帶位置)，故無法建立不同深度礫石層的礫石旋轉量與覆土壓力的關係。未來可在數值分析中加入有重量之結構物探討覆土壓力與礫石的旋轉量關係，探討同一深度位置的礫石在有無建築物負重的情況下之旋轉量；或進行直剪試驗數值模擬，探討不同正向力與礫石旋轉量的關係。
7	楊國鑫教授	物理試驗對應現地的尺寸因子是多少？礫石的粒徑是否合理的縮小？	本研究按照地層厚度縮尺 1/100，即可以模擬 20m 地層以及一次地震事件的斷層垂直抬升量 1~5m 的情況。覆土層厚度是影響斷層錯動引致上覆土層之變形行為的關鍵因素，故縮尺大小以覆土層厚度為主。現地礫石常見的尺寸為數公分至數十公分，若在數值分析中同樣縮小 100 倍則應該為 mm 等級，但受限於電腦運算效能，故無法讓顆粒完全符合尺寸縮小。
8	楊國鑫教授	數值模擬中的參數敏感度分析結果是否能用材料勁度等定量方式解釋此結果？	在數值分析中，可以藉由三軸試驗繪製出試體的應力應變曲線決定土層之楊氏模數。張光宗等人(2014)曾經透過 PFC <sup>2D</sup> 進行卵礫石試體的雙軸試驗，結果顯示卵礫石含量愈高，楊氏模數愈大。
9	張光宗教授	研究中定義了礫石旋轉量有正負值，在數值模型與現地地層剖面中，如何判斷是否會有旋轉超過一圈	在複合地層物理砂箱試驗的礫石上貼有箭頭，配合試驗過程的錄影可以確認礫石沒有旋轉超過一圈的情形；在數值模型中，「euler」值紀錄的範圍是 -90°~+90°，若礫石從正方向旋轉超過一圈(>+90°)，則 euler 值會變成負方向。本研究中的小尺度數值模擬基盤抬升

編號	提問委員	問題	回覆情形
		的情況？	比至 0.25，竹山槽溝模擬基盤抬升比至 0.41，均無出現旋轉超過一圈的情況，已足以描述竹山槽溝之復原剖面。
10	張光宗教授	在竹山槽溝中，影像辨識的最小礫石長軸長度為 4cm，此篇論文如何定義礫石的粒徑分界？	本研究假設之礫石為具有長徑比的橢球顆粒，故區分礫石與基質的粒徑分界係以是否考慮顆粒粒形的尺寸大小。參考褚炳麟等人（1996）針對每一個大於 1"（2.54cm）的卵礫石才進行粒形分析的試驗方法，故本研究以 1" 為界。此部分亦補充說明至第 4.1.3 節。
11	張光宗教授	物理試驗、數值分析中的礫石和基質的粒徑比例為何？是否與現實情況相符？	物理試驗中的礫石短軸長度與基質半徑比約 14 倍（14mm/0.98mm），數值分析中的比值約為 6（14mm/2.5mm）。現地之礫石短軸可能為數公分至數十公分，基質半徑可能為數 mm，此比值遠大於物理試驗與數值分析的假設。但本研究著重於探討礫石層中具有長徑比之礫石組構特性對於地層變形的結果，礫石與基質的含量比例為主要探討與控制因素，故物理試驗的基質部分僅使用容易取得之使用砂顆粒填充；數值分析中受限於電腦運算效能限制，僅能使用尺寸相對砂顆粒大的球顆粒填充。
12	林銘郎教授	建議補充說明並定量分析竹山槽溝各推動階段之變形結果。	感謝委員的建議，分析結果補充說明至第 5.3 節。