



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

以個別元素法界定凝聚性覆土材料

於正斷層之地表及土中變形帶

Evaluation of Surface and  
Subsurface Deformation Zone of Normal Fault  
within Bonded Overburden Soil  
by Distinct Element Method

呂貞怡

Jhen-Yi Lyu

指導教授：林銘郎 博士

Major Professor: Ming-Lang Lin, Ph.D.

中華民國 104 年 6 月

Jun. 2015

# 口試委員會審定書



## 國立臺灣大學碩士學位論文 口試委員會審定書

以個別元素法界定凝聚性覆土材料  
於正斷層之地表及土中變形帶

Evaluation of Surface and Subsurface Deformation Zone  
of Normal Fault within Bonded Overburden Soil  
by Distinct Element Method

本論文係呂貞怡君（R02521102）在國立臺灣大學土木工程學系  
碩士班完成之碩士學位論文，於民國 104 年 6 月 26 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)

李 崇 正

林 銘 郎

李 崇 正

李 宏 輝

李 宏 輝

黃 文 昭

黃 文 昭

系主任

呂 良 正

呂 良 正

(簽名)



## 摘要

基盤上覆土材料之性質及厚度為控制斷層錯動後覆土中剪切帶發展之主要因素。土壤主要可分為凝聚性及非凝聚性材料，前者，如黏土，受力後會形成張力裂縫，使張力裂縫之尖端與基盤初始小位移錯動時形成之破裂面相連。

應用個別元素法於斷層模擬可直接觀測土體內之破壞機制及變形帶之發展。且數值模擬較物理試驗易於取得模型內之受力、變形資料。本研究以個別元素法搭配前人之離心機模擬成果，以離心試驗為真，校正數值模擬參數，使兩者之產狀相符，進而探討不同覆土深度、覆土材料性質之正斷層土中變形帶演育歷程，以推估未來可能錯動斷層之土體變形機制。

數值及離心模型之尺寸相同，為斷層面傾角 60 度之正斷層，於 1g 狀態下，其覆土厚為 0.2 米，施加離心力後，對應之現地覆土厚最多可達 16 米。模型於錯動率(上盤之垂直位移量除以總覆土厚)達到 25% 時錯動完成。覆土材料包含純砂層、純黏土層、砂黏土互層。

本研究證明個別元素法之數值模擬工具可應用於離心機斷層砂箱模擬。同樣的基盤錯動率及覆土厚下，砂性覆土層具有較寬廣的剪動帶，地表之變形剖面為平緩且具連續性，斷層崖由安息角主控；黏土性覆土會在極小基盤錯動率時於地表發展張力裂縫，並與斷層基盤尖端之初始剪動帶相連，並於地表發育坡度陡峭之斷層崖，使地表變形剖面不連續。另也利用數值模擬建立具離心環境的生長斷層，以凝聚性及非凝聚性覆土材料觀察其地表及土中變形差異。

關鍵詞：正斷層、斷層崖、地表影響範圍、個別元素法、張力裂縫



## Abstract

The depth and character of the overlying earth deposit contribute to fault rupture path. For cohesive soil, for instance, clay, tension cracks on the ground happen during faulting, limiting the propagation of fracture in soil mass. The cracks propagate downwards while the fracture induced by initial displacement of faulting propagates upwards. The connection of cracks and fracture will form a plane that is related to tri-shear zone.

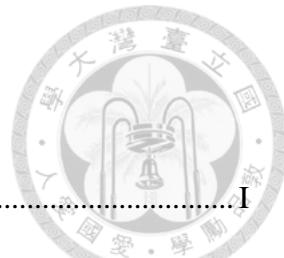
With application of distinct element method the mechanism of fault propagation in soil mass and the development of ground deformation zone can be observed directly in numerical analysis of faulting. The information of force and deformation in the numerical model are also easier to be obtained than centrifuge modeling. Therefore, we take the results of centrifuge modeling as the field outcrop then modify the micro-parameter of numerical analysis to make sure both of them have the same attitude.

A series of centrifuge tests and numerical modeling are conducted at this study with maximum acceleration conditions of 80g (equals to 16m thick of overburden soil) and dip angle of  $60^\circ$  on normal faulting. The model is with total overburden soil thick, H, 0.2m, vertical displacement of moving wall,  $\Delta H$ . At the beginning, hanging wall and the left-boundary wall moves along the plane of fault. When  $\Delta H/H$  equals to 25%, both of the walls stop moving.

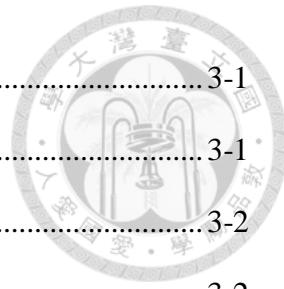
This study proved that the numerical analysis can be applied on simulation of centrifugal modeling and overburden soil deformation by normal faulting.

Keyword: normal fault, fault scarp, ground deformation zone, distinct element method, tension crack

# 目錄



口試委員會審定書 .....	I
摘要 .....	II
Abstract.....	III
目錄 .....	IV
圖目錄 .....	VII
表目錄 .....	XIII
第 1 章 緒論 .....	1-1
1.1 研究動機 .....	1-1
1.2 研究目的 .....	1-6
1.3 研究內容與流程 .....	1-6
第 2 章 文獻回顧 .....	2-1
2.1 現地調查 .....	2-2
2.1.1 黏土覆土材料於正斷層之變形行為 .....	2-2
2.1.2 山腳斷層 .....	2-3
2.2 物理試驗 .....	2-6
2.2.1 1g 模型試驗 .....	2-6
2.2.2 離心機模型試驗 .....	2-7
2.2.3 生長斷層試驗 .....	2-15
2.3 數值模擬 .....	2-17
2.3.1 材料參數 .....	2-17
2.3.2 1g 斷層模擬 .....	2-19
2.3.3 離心機斷層模擬 .....	2-19
2.3.4 生長斷層模擬 .....	2-22



第 3 章	研究方法 .....	3-1
3.1	個別元素法 .....	3-1
3.2	數值模擬工具 .....	3-2
3.2.1	計算原理 .....	3-2
3.2.2	組成模型 .....	3-3
3.2.3	鍵結模型 .....	3-6
第 4 章	數值模型建立 .....	4-1
4.1.1	邊界條件設計 .....	4-1
4.1.2	材料參數 .....	4-5
4.1.3	資料處理及驗證 .....	4-11
第 5 章	離心機正斷層之數值模擬成果 .....	5-1
5.1	純砂質覆土材料 .....	5-1
5.1.1	與前人之物理離心機試驗比對 .....	5-1
5.1.2	改變砂土摩擦角 .....	5-17
5.1.3	不同覆土厚度 .....	5-19
5.1.4	改變斷層傾角 .....	5-21
5.1.5	正斷層錯動引致之地表變形帶 .....	5-24
5.2	純黏土質覆土材料 .....	5-26
5.2.1	與前人之物理離心機試驗比對 .....	5-27
5.2.2	改變覆土厚度 .....	5-31
5.2.3	剪動帶發展趨勢 .....	5-32
5.3	複合覆土材料 .....	5-35
5.3.1	與前人之物理離心機試驗比對 .....	5-35
第 6 章	離心機生長正斷層之數值模擬成果 .....	6-1
6.1	模擬離心機之生長正斷層 .....	6-1

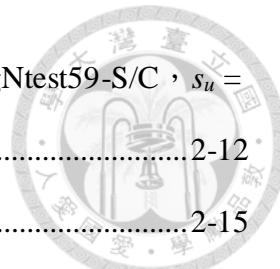


6.1.1	模型建立.....	6-1
6.1.2	與無生長地層之離心機正斷層比對 .....	6-3
6.1.3	具凝聚性及非凝聚性覆土之離心生長正斷層 .....	6-5
第 7 章	結論與建議 .....	7-1
7.1	結論 .....	7-1
7.2	建議.....	7-1
參考文獻 .....		1
附錄 A	離心純砂正斷層錯動流程 .....	1
附錄 B	離心純黏土正斷層錯動流程.....	5
附錄 C	離心複合土層正斷層錯動流程 .....	7
附錄 D	篩選邏輯門檻值之參考 .....	11
附錄 E	碩士學位考試口試委員提問與回覆表 .....	12



## 圖 目 錄

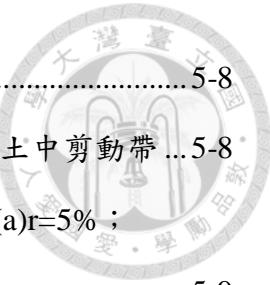
圖 1-1 台灣活動斷層分布圖(中央地質調查所，2012).....	1-2
圖 1-2 山腳斷層與台北盆地之相對位置 .....	1-3
圖 1-3 林口台地沿線地形崖(中央地質調查所，2011).....	1-3
圖 1-4 山腳斷層通過林口台地及台北盆地之剖面.....	1-4
圖 1-5 山腳斷層於林口台地之斷層崖及地層分布 .....	1-4
圖 1-6 研究流程圖 .....	1-8
圖 2-1 具韌性之低強度覆土材料受正斷層錯動後之剖面(Bray，1994).2-2	
圖 2-2 位於樹林之山腳斷層十五號井(SCF-15)、十六號井(SCF-16)等鑽孔位置(朱聖心，2014).....	2-4
圖 2-3 位於五股之山腳斷層一號井(SCF-1)、二號井(SCF-2)等鑽孔位置 (朱聖心，2014).....	2-4
圖 2-4 山腳斷層二號井(SCF-2)鑽孔深度 137m 至 156.3m 處呈現層面傾斜及正斷層的小構造(朱聖心，2014).....	2-5
圖 2-5 No.306 石英砂砂粒徑分布圖(陳榮華，2013).....	2-9
圖 2-6 離心機試驗用砂及人工黏土(陳榮華，2013).....	2-9
圖 2-7 黏土試體十字片剪不排水剪力強度與深度之關係(N40gNtest32-C、50gNtest36-C、80gNtest37、80gRtest38)(陳榮華，2013) .....	2-10
圖 2-8 不同離心加速度下純砂試體正斷層於錯動率 25% 時之側剖面。 (a)1g；(b)40g；(c)80g (張有毅，2013).....	2-11
圖 2-9 不同剪力強度純黏土試體正斷層於錯動率 25% 時之側剖面。(陳榮華，2013).....	2-12
圖 2-10 不同土層正斷層錯動試驗於錯動率 25% 時之側剖面。 (a)70gNtest80-C/S， $s_u = 100\text{kPa}$ ；(b)70gNtest82-C/S， $s_u = 50\text{kPa}$ ；	



(c)70gNtest81-C/S , $s_u = 100\text{kPa}$ (張庭傑 , 2014) ; (d)80gNtest59-S/C , $s_u = 100\text{kPa}$ (陳榮華 , 2013).....	2-12
圖 2-11 生長正斷層砂箱試驗示意圖(朱聖心 , 2014).....	2-15
圖 2-12 生長正斷層砂箱模型之剪切帶發展現象及數據描繪(朱聖心 , 2014).....	2-16
圖 2-13 生長正斷層與無生長斷層砂箱模型之剪切帶發展(朱聖心 , 2014)	2-16
.....	2-16
圖 2-14 純砂逆斷層之地表變形剖面示意圖(張有毅 , 2013).....	2-20
圖 2-15 以 Gompertz 函數耦合逆斷層錯動之地表變形剖面(張有毅 , 2013).....	2-20
圖 2-16 顆粒摩擦係數及固定旋轉比例對巨觀砂土摩擦角之影響(中央地調所 , 2014).....	2-21
圖 2-17 以 PFC2D 建置之生長正斷層砂箱模型(朱聖心 , 2014).....	2-23
圖 2-18 五股剖面的數值分析模型與 SCF-2 鑽井之層面傾斜及正斷層小構造比對(朱聖心 , 2014).....	2-23
圖 3-1 PFC 數值軟體之運算循環流程(Itasca , 2004) .....	3-3
圖 3-2 球與球之接觸模式(Itasca , 2004) .....	3-5
圖 3-3 圖牆與球之接觸模式(Itasca , 2004) .....	3-5
圖 3-4 平行鍵結(parallel bond)之示意圖(Itasca , 2004).....	3-7
圖 3-5 接觸鍵結(contact bond)之示意圖 (Itasca , 2004).....	3-7
圖 3-6 接觸鍵結之張力破壞(Itasca , 2004) .....	3-7
圖 3-7 接觸鍵結之剪動破壞(Itasca , 2004) .....	3-7
圖 4-1 PFC 時階設定與模型運算時不平衡力之關係 .....	4-4
圖 4-2 數值模型之邊界設定 .....	4-4
圖 4-3 數值模型之純砂土編號 .....	4-4



圖 4-4 數值模型之純黏土編號 .....	4-4
圖 4-5 基盤承受覆土應力理論值及實際值比對 .....	4-5
圖 4-6 人工黏土進行單壓試驗之應力應變曲線(國立中央大學李崇正老師 團隊提供) .....	4-7
圖 4-7 數值單壓模擬之應力應變曲線 .....	4-7
圖 4-8 正向強度 60N 切向強度 90N 之數值單壓結果 .....	4-8
圖 4-9 正向強度 100N 切向強度 150N 之數值單壓結果 .....	4-8
圖 4-10 數值模擬與物理離心機之粒徑曲線 .....	4-8
圖 4-11 覆土材料為純黏土斷層模型未錯動時之鍵結狀態 .....	4-9
圖 4-12 覆土材料為黏土於砂土上斷層模型未錯動時之鍵結狀態 .....	4-9
圖 4-13 覆土材料為砂土於黏土上斷層模型未錯動時之鍵結狀態 .....	4-9
圖 4-14 影響範圍篩選邏輯示意圖 .....	4-12
圖 4-15 影響範圍之三項篩選條件 .....	4-12
圖 4-16 地表影響範圍工作流程 .....	4-13
圖 4-17 正斷層上下盤之地表影響範圍示意圖 .....	4-13
圖 4-18 黏土覆土層受正斷層錯動形成之地表張力裂縫 .....	4-14
圖 4-19 黏土覆土層受正斷層錯動形成之地表斷層崖 .....	4-14
圖 5-1 物理試驗 1g 純砂正斷層側剖面及土中剪動帶(張有毅，2013)...	5-4
圖 5-2 數值模擬 1g 純砂正斷層側剖面側剖面及土中剪動帶 .....	5-4
圖 5-3 數值模擬 1g 純砂正斷層與物理試驗比較之剪動帶 .....	5-5
圖 5-4 物理離心機試驗 40g 純砂正斷層側剖面及土中剪動帶(張有毅， 2013).....	5-6
圖 5-5 數值離心機模擬 40g 純砂正斷層側剖面側剖面及土中剪動帶 ...	5-6
圖 5-6 數值模擬 40g 純砂正斷層與物理試驗比較之剪動帶 .....	5-7
圖 5-7 物理離心機試驗 80g 純砂正斷層側剖面及土中剪動帶(張有毅，	



2013).....5-8

圖 5-8 數值離心機模擬 80g 純砂正斷層側剖面側剖面及土中剪動帶 ...5-8

圖 5-9 不同錯動率下 N60g1S10 之地表影響範圍示意圖(a)r=5% ;  
(b)r=10% ; (c)r=15% ; (d)r=20% ; (e)r=25% .....5-9

圖 5-10 不同錯動率下 N60g40S10 之地表影響範圍示意圖(a)r=5% ;  
(b)r=10% ; (c)r=15% ; (d)r=20% ; (e)r=25% .....5-10

圖 5-11 不同錯動率下 N60g80S10 之地表影響範圍示意圖(a)r=5% ;  
(b)r=10% ; (c)r=15% ; (d)r=20% ; (e)r=25% .....5-11

圖 5-12 不同錯動率下 N60g1S10 之地表變形剖面 .....5-12

圖 5-13 不同錯動率下 N60g1S10 之地表影響範圍 .....5-12

圖 5-14 不同錯動率下 N60g40S10 之地表變形剖面 .....5-13

圖 5-15 不同錯動率下 N60g40S10 之地表影響範圍 .....5-13

圖 5-16 不同錯動率下 N60g80S10 之地表變形剖面 .....5-14

圖 5-17 不同錯動率下 N60g80S10 之地表影響範圍 .....5-14

圖 5-18 不同錯動率及 g 數之純砂正斷層地表影響範圍 .....5-15

圖 5-19 錯動率 25% 下不同 g 數之純砂正斷層地表影響範圍 .....5-15

圖 5-20 純砂正斷層傾角 60 度覆土 15 米不同砂土摩擦角於錯動率達到  
25% 時之地表變形剖面(a) $\phi=33^\circ$  ；(b)  $\phi=36^\circ$  ；(c)  $\phi=40^\circ$  ；(d)  $\phi=47^\circ$

.....5-18

圖 5-21 純砂正斷層傾角 60 度砂土摩擦角 33 度於錯動率達到 25% 時，  
不同覆土厚之地表變形剖面(a)覆土 5 米(b)覆土 10 米(c)覆土 15 米 ....5-20

圖 5-22 純砂正斷層於 25g 重力場下不同斷層傾角於錯動率達到 25% 時  
之純砂正斷層變形剖面-1 (a)  $22.5^\circ$  ；(b)  $30^\circ$  ；(c)  $37.5^\circ$  ；(d)  $45^\circ$  ；  
(e)  $52.5^\circ$  .....5-22

圖 5-23 純砂正斷層於 25g 重力場下不同斷層傾角於錯動率達到 25% 時



之純砂正斷層變形剖面-2 (f)60° ；(g)67.5° ；(h)75° ；(i)82.5° ；(j)90° ..... 5-23

圖 5-24 純砂離心正斷層擴大模擬之正規化地表影響範圍與錯動率之關係 ..... 5-25

圖 5-25 低強度黏土質覆土材料於傾角 60 度之正斷層之數值與物理試驗比對 ..... 5-29

圖 5-26 高強度黏土質覆土材料於傾角 60 度之正斷層之數值與物理試驗比對 ..... 5-30

圖 5-27 不同覆土厚度之低強度黏土數值砂箱模擬 ..... 5-31

圖 5-28 傾角 60 度低強度黏土質覆土材料於不同錯動率下之斷鍵發展 ..... 5-33

圖 5-29 傾角 60 度低強度黏土質覆土材料於不同錯動率下之斷鍵增量發展 ..... 5-34

圖 5-30 傾角 60 度低強度黏土質覆土材料於不同錯動率下之斷鍵數量 ..... 5-35

圖 5-31 砂土層覆蓋低強度黏土層之離心機正斷層數值與物理試驗比較 ..... 5-37

圖 5-32 砂土層覆蓋低強度黏土層離心機正斷層之黏土層特寫 ..... 5-38

圖 5-33 低強度黏土層覆蓋砂土層之離心機正斷層數值與物理試驗比較 ..... 5-39

圖 6-1 數值離心生長正斷層之模型示意圖 ..... 6-2

圖 6-2 數值離心純砂正斷層有無生長地層之比較(a)具生長地層並錯動共 10 次(b)無生長地層一次錯動完成 ..... 6-4

圖 6-3 離心機之生長正斷層模擬與岩心照片之比較 ..... 6-4

圖 6-4 數值離心純砂正斷層具 10 次生長地層之沉積錯動產狀-1(a)至(e)



依序為生長並錯動完成 1 至 5 次 .....	6-6
圖 6-5 數值離心純砂正斷層具 10 次生長地層之沉積錯動產狀-2(f)至(j)依序為生長並錯動完成 6 至 10 次 .....	6-7
圖 6-6 數值離心純黏土正斷層具 10 次生長地層之沉積錯動產狀-1(a)至(e)依序為生長並錯動完成 1 至 5 次 .....	6-8
圖 6-7 數值離心純黏土正斷層具 10 次生長地層之沉積錯動產狀-1(a)至(e)依序為生長並錯動完成 6 至 10 次 .....	6-9

# 表目錄



表 1-1 山腳斷層參數資料表(中央地質調查所，2010).....	1-5
表 2-1 以 PFDHA 年超越機率分析之斷層位移量(鍾春富、林銘郎， 2004).....	2-5
表 2-2 不同條件之正斷層試驗(蔣佳興，2006).....	2-7
表 2-3 試驗砂土之基本物理性質(張有毅，2013、陳榮華，2013).....	2-13
表 2-4 人工黏土基本物理性質(El Naggar 等人，2007).....	2-13
表 2-5 陳榮華進行之離心機正斷層物理砂箱試驗(陳榮華，2013).....	2-14
表 2-6 張庭傑進行之離心機正斷層物理砂箱試驗(張庭傑，2014).....	2-14
表 2-7 以控制顆粒旋轉進行數值直剪試驗所得之砂土摩擦角(中央地調 所，2014) .....	2-21
表 4-1 數值模擬材料參數表 .....	4-10
表 5-1 前人純砂離心正斷層試驗編號及試驗條件 .....	5-1
表 5-2 不同錯動率下 1g 純砂正斷層之地表影響範圍 .....	5-16
表 5-3 不同錯動率下 40g 純砂正斷層之地表影響範圍 .....	5-16
表 5-4 不同錯動率下 80g 純砂正斷層之地表影響範圍 .....	5-16
表 5-5 離心純砂正斷層 330 組模擬矩陣 .....	5-25
表 5-6 前人試驗編號及試驗條件 .....	5-26
表 5-7 離心正斷層純黏土總組數模擬矩陣 .....	5-26
表 5-8 前人試驗編號及試驗條件 .....	5-35
表 6-1 凝聚性覆土離心生長正斷層之材料參數 .....	6-2



## 第1章 緒論

### 1.1 研究動機

位於環太平洋地震帶的台灣，斷層錯動引致之災害為一民生重大損傷。目前對於斷層破壞機制仍採推理方法，於錯動發生後，現地觀察地表破裂跡後，搭配地球物理及鑽探調查等，由地層剖面分布反推歷史之土層沉積及錯動歷程。然斷層錯動後，常因地表材料崩落再堆積，甚至風化，而不易於觀察其斷層地表破裂跡之構造。

根據地調所 2012 年出版之臺灣活動斷層分布圖(見**圖 1-1**)，山腳斷層被分類於第二類活動斷層(其定義為過去 10 萬年至 1 萬年內曾活動者)，但因其斷層位置緊鄰台北盆地(見**圖 1-2**)，一旦產生斷層錯動，則會造成重大損傷。山腳斷層為一高傾角的正斷層，一般假定為 60 度(見**表 1-1**)，其西方為林口台地。臺北盆地及林口台地被認為是因山腳斷層錯動引致而成(林朝榮，1957；王執明等，1978)，以土壤力學角度而言，無凝聚性之砂性土壤不應有此高角度之崖坡。故本研究設計具有凝聚性覆土的正斷層，並觀察其錯動後之地表形貌，證明具凝聚性覆土的正斷層易於斷層尖端投影至地表周圍產生高角度之斷層崖。

物理砂箱試驗及數值模擬為常見的斷層錯動引致覆土變形觀察工具，早期多為縮小模型尺度，但由於尺度效應(scale effect)，亦需弱化材料之強度參數以符合現地尺度之產狀。近年國內亦有利用離心機進行正逆斷層之覆土變形研究，可減少 1g 模型之尺度效應問題。陳榮華(2013)利用人工黏土模擬黏性土壤於斷層錯動後之地表變形，而張有毅(2013)則是以個別元素法搭配離心機物理試驗模擬具純砂覆土之正逆斷層。張庭傑(2014)進一步進行黏砂土互層及砂黏土的離心試驗。故本研究考慮土壤之現地應力及具凝聚力土壤之破壞機制不同於非凝聚性土壤，並考慮土壤原為顆粒性材料，而採個別元素法運算之數值模擬，類比前人之離心

機試驗，確認其數值砂箱之正確性，再延伸至凝聚性顆粒材料受斷層錯動，進行其地表變形及土中破裂面發展趨勢。

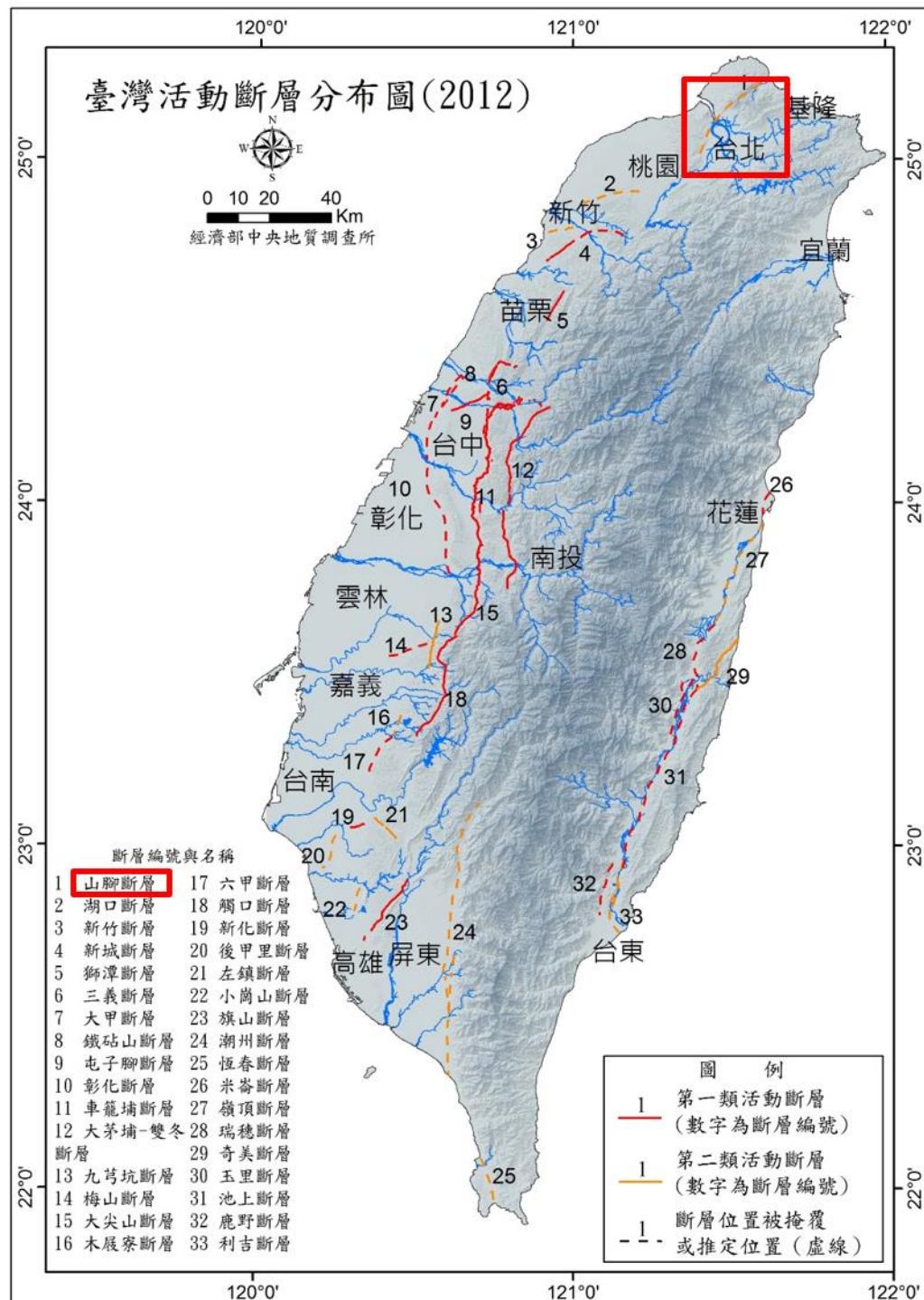


圖 1-1 台灣活動斷層分布圖(中央地質調查所，2012)

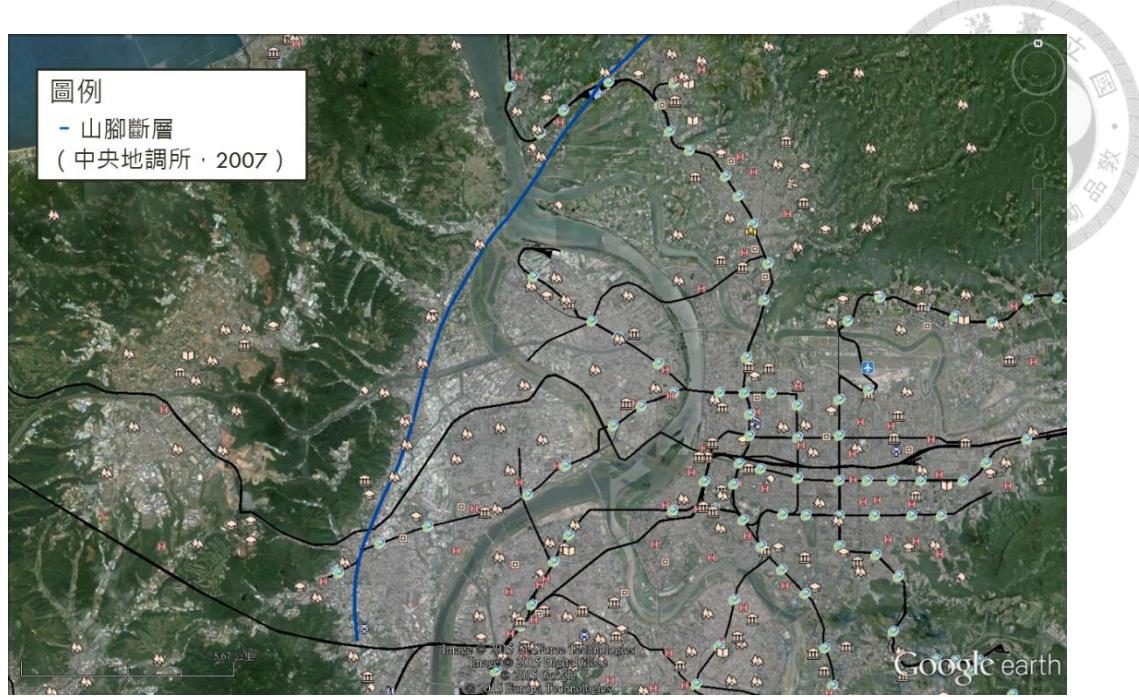


圖 1-2 山腳斷層與台北盆地之相對位置

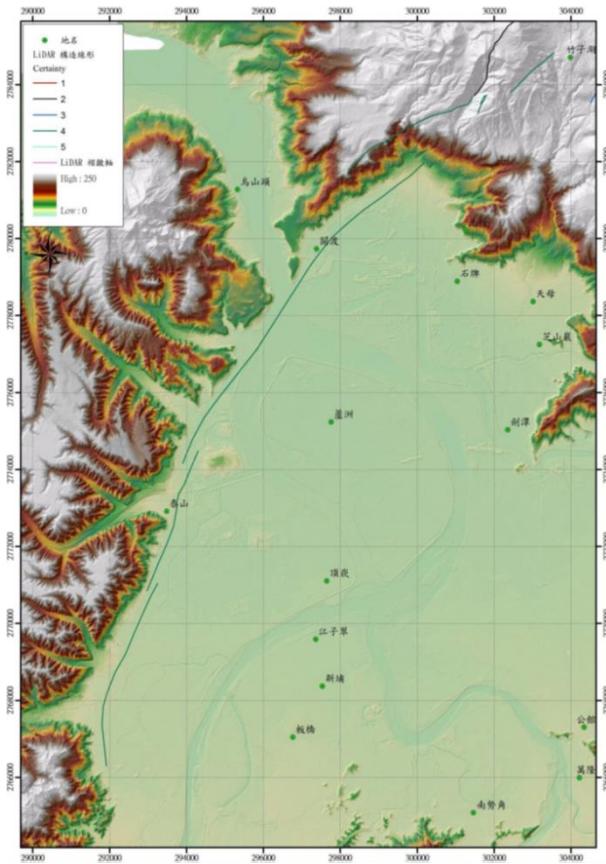


圖 1-3 林口台地沿線地形崖(中央地質調查所，2011)



圖 1-4 山腳斷層通過林口台地及台北盆地之剖面

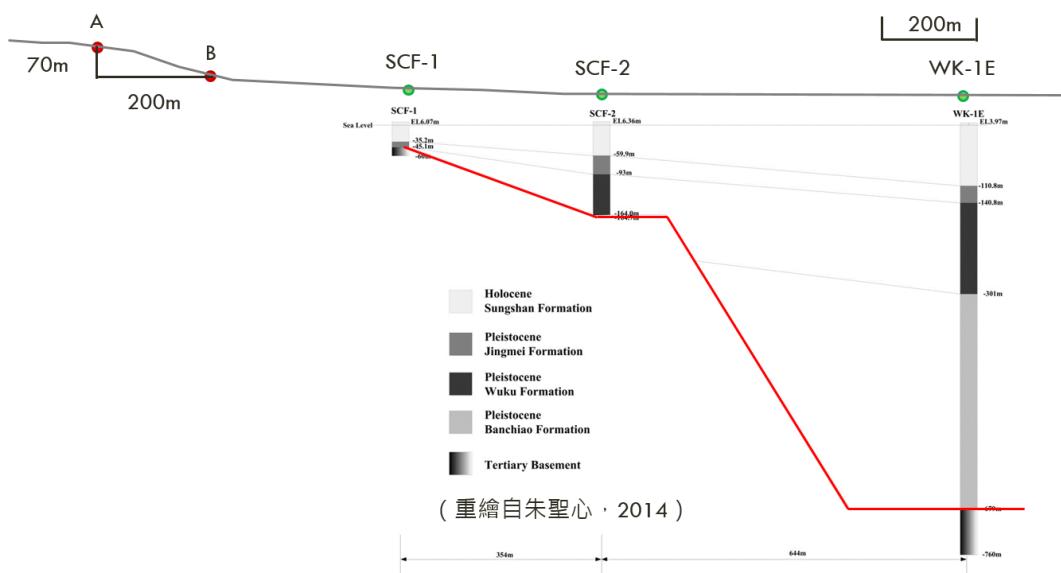


圖 1-5 山腳斷層於林口台地之斷層崖及地層分布



表 1-1 山腳斷層參數資料表(中央地質調查所，2010)

分段	長度(km)	滑移特性	斷層傾角	短期滑移	最近一次	可能最大
			(度/方向)	速率 (mm/year)	活動時間 (year)	地震規模 (M)
北段	22	正移	>60/東	2.2 v	<11000	6.9
南段	13			-		



## 1.2 研究目的

本研究考慮土壤之現地應力及具凝聚性土壤之破壞機制不同於非凝聚性土壤，而採數值模擬類比前人之離心機試驗，確認其產狀相符後，再延伸至凝聚性顆粒材料受斷層錯動，進行其地表變形及土中破裂面發展趨勢。其目標如下：

一、確認數值工具可進行物理離心機之模擬。並加以應用於凝聚性材料及生長斷層。

二、觀察數值模擬之離心斷層及生長斷層之覆土層變形行為，包含凝聚性與非凝聚性材料之變形帶發展趨勢、凝聚性材料因應變集中產生之土中破裂隨錯動率延伸至地表之關係。

三、根據數值模擬成果提出關於凝聚性覆土材料受斷層錯動後產生之地表變形特徵。

## 1.3 研究內容與流程

本研究之內容主要分為三大部份，現地調查資料分析、物理試驗資料分析及數值模擬，搭配之流程圖如**圖 1-3**。首先進行現地及前人物理試驗之文獻資料分析，做為數值模型邊界及材料之設計參考，並將數值砂箱之初步成果與物理試驗比對，驗證其正確性，再應用於模擬不同覆土厚度、材料、斷層傾角及具有生長地層之離心正斷層，並觀察其地表及土中變形帶之特性。詳細說明如下：

一、現地調查資料分析：現地調查為斷層引致覆土變形之一大判斷證據，但因具有即期性，若無法在第一時間到達現場，地表之變形產狀可能被人為處理或是自然風化而不覆存在，故本研究回顧文獻，整理出可供數值模型設計之資料，包含山腳斷層之地層分布、基盤錯動量等。

二、物理試驗資料分析：一般而言，物理試驗為除現地試驗外最具有可信度之模型，以斷層及覆土變形而言，多進行砂箱(sand box)試驗，以模型邊



界為斷層構造，內可填充性材料或黏土質材料作為覆土層。早期之發展多為  $1g$  模擬，即模擬強度等性質應有適當尺度的縮減(即尺度效應)，以符合現地幾何放大後之產狀。而現今已可利用離心機試驗進行砂箱試驗，更能貼近現地土體應力之情形。

三、數值模擬：本研究先進行初步分析，以離心機砂箱之產狀為比對依據，確認數值砂箱之正確性，而後進一步模擬不同覆土厚度、材料、斷層傾角及具有生長地層之離心正斷層，並觀察其地表及土中變形帶之特性。

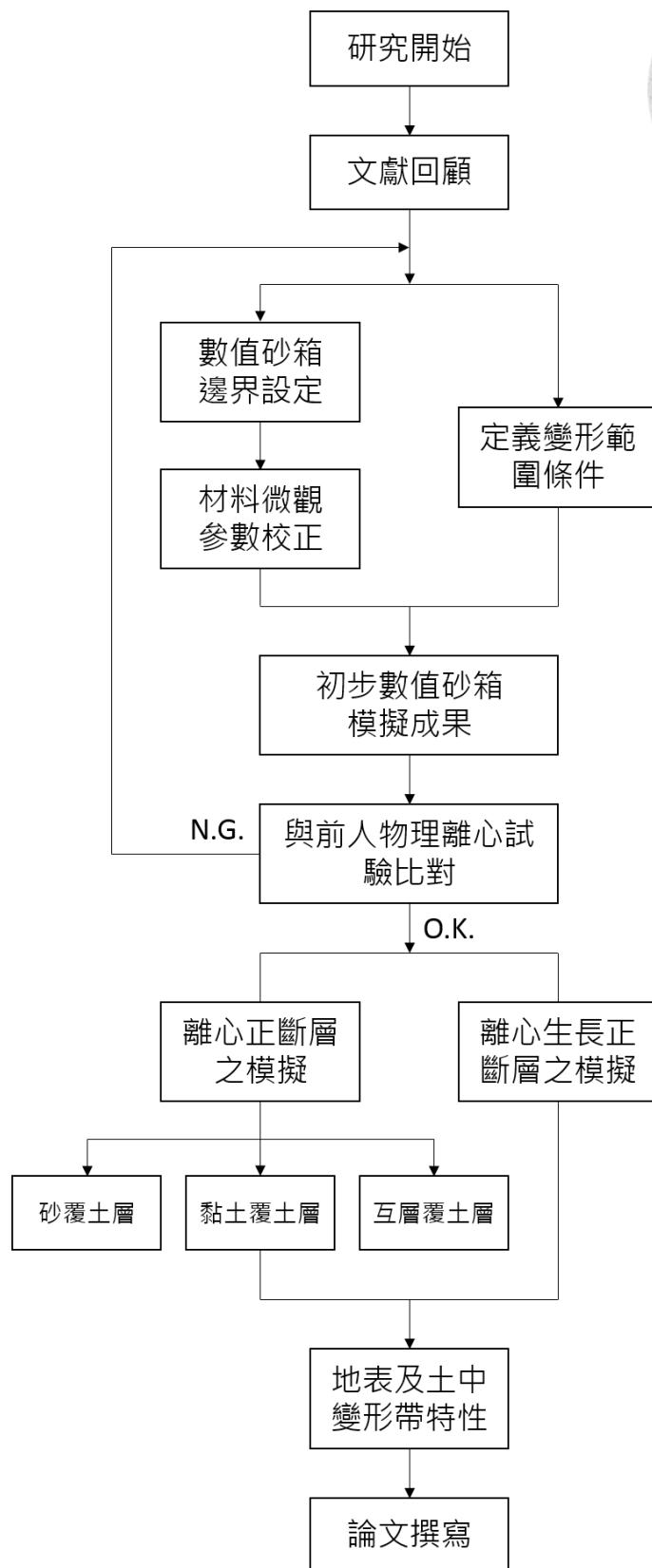


圖 1-6 研究流程圖



## 第2章 文獻回顧

對於斷層錯動引致之覆土層變形，可藉由親至現地調查、室內物理試驗及數值模擬分析進行研究。

現地調查通常為斷層錯動後，初步描繪地表破裂跡，搭配槽溝開挖、地球物理方法及鑽探調查等，由地層剖面分布反推歷史之土層沉積及錯動歷程。然斷層錯動後，常因地表材料崩落再堆積，甚至風化，而不易於觀察其斷層地表破裂跡之構造。

物理試驗具有可直接觀察斷層錯動後材料之變形特性及發展歷程之優點，且材料物理性質容易控制，可調整至與現地覆土相近，使其產狀具有一定之準確性，但因模型必定需要縮小尺度，無法反應現地覆土應力，而具有尺度效應(scale effect)，需弱化材料強度以符合現地尺度之產狀。離心機試驗應用於斷層模擬，因可施加重力加速度於砂箱模型中，可減少尺度效應之影響，但卻受控於儀器設計限制及經費因素，可模擬之覆土深度具有其上限值。

相較於前兩者，數值模擬為一相對簡易且具經濟性之工具，可有效解決物理試驗之尺度效應，藉由設定正確之邊界條件及材料參數，亦可進行全尺度模擬。



## 2.1 現地調查

本節針對黏土覆土材料於斷層錯動之變形行為及前人對於山腳斷層之成因、基盤深度、覆土材料及可能之一次錯動量進行文獻資料分析，以做為後續數值模擬砂箱之設計依據。現地調查為斷層引致覆土變形之一大判斷證據，但因具有即期性，若無法在第一時間到達現場，地表之變形產狀可能被人為處理或是自然風化而不覆存在。

### 2.1.1 黏土覆土材料於正斷層之變形行為

Bray 等人(1994)整理自 1915 年以來國內外因重大地震後之地表變形產狀調查，進行案例分析。其文章內主要以斷層之型態(正、逆斷層)與覆土層之種類做為分類。Bray 對於材料之描述以「脆性材料」及「延展性材料」為主，純黏土質覆土便被分類為後者。當一正斷層之覆土為黏土材料時，地表會產生張力裂縫(見 **圖 2-1**)，形成一開口弱面，使斷層基盤之初始剪動帶容易向裂縫處延伸發展。以本研究之角度，將覆土材料分為無凝聚性(如純砂)及低凝聚性(如黏土，強度為 kPa 等級)材料因斷層錯動產生之地表變形常有曲線狀，後者則有斷層崖，而高凝聚性且高強度之材料(如岩化作用較高之材料，強度為 MPa 等級)則容易引致明確的地表變形帶。

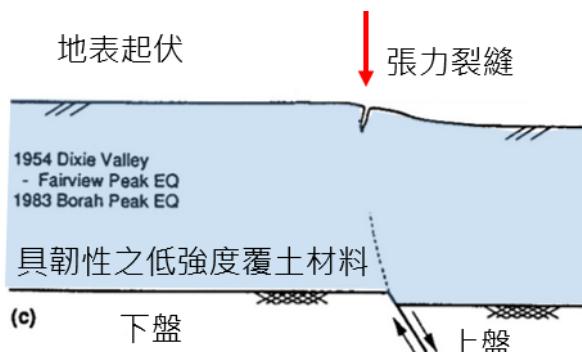


圖 2-1 具韌性之低強度覆土材料受正斷層錯動後之剖面(Bray, 1994)



## 2.1.2 山腳斷層

林朝榮(1957)於林口台地進行現地調查，於其林口台地之東南處邊原發現有直線之斷層崖及三角面，可為山腳斷層錯動後形成斷層崖，而後遇風化切割之證據。

經濟部中央地質調查所自 1999 年起開始施作鑽探調查，針對山腳斷層之基盤位置及覆土厚度進行分析。共完成忠義、關渡、成子寮、五股及樹林等剖面，以下主要討論樹林剖面(見圖 2-2)及五股剖面(見圖 2-3)：樹林剖面之山腳斷層十五號井(SCF-15)及山腳斷層十六號井(SCF-16)鑽孔，基盤深度分別為 52 米及 136.52 米，基盤落差近 84 米，因此判斷山腳斷層面在此兩鑽孔之間(劉桓吉等人，2000)；而位於五股的山腳斷層一號井(SCF-1)及山腳斷層二號井(SCF-2)鑽孔，基盤深度分別為 45.1 米及 164 米，且 SCF-2 鑽孔位於深度 137 至 156.3 米處之岩心(見圖 2-4，WK-03 為 SCF-2 之原始名稱)，具有砂與泥組成之薄葉狀互層(lamination)，為一傾斜層面及正斷層的局部構造，推測可能是山腳斷層上盤數十至數百公尺厚的未固結沉積物，受到山腳斷層下滑時拖曳而發育(劉桓吉等人，2000)。

謝昭輝等人(2000)以震測調查結果，在關渡地區，山腳斷層帶地表寬度約 170 米，在泰山地區，其斷層寬度則是約 80 米。

由於山腳斷層沒有地表露頭(劉桓吉，2000)，其座落位置仍不明確，因此採用機率式斷層位移危害度分析(Probability Fault Displacement Hazard Analysis，PFDHA)，將不確定之因素以機率式分布進行評估，並考慮區域地質分布。此方法學主要有地震法及位移法。鍾春富等人(2004)以 PFDHA 方法學進行山腳斷層分析，結果顯示滑移速率與年超越機率成正比，但不確定性高，並推算得在 50 年內年超越機率 2% 之斷層位移量，地震法約為 0.32 至 0.68 m、位移法約為 2.18 m(見表 2-1)。

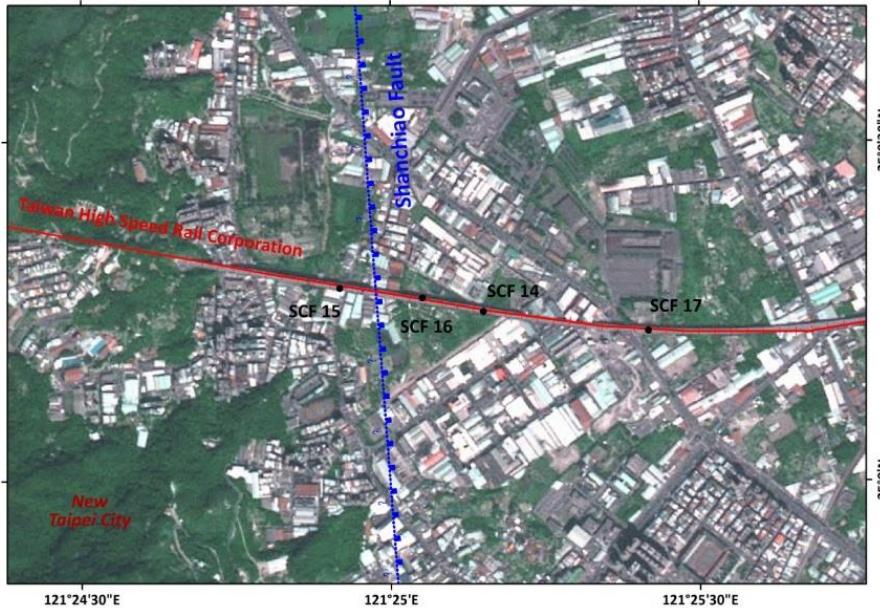


圖 2-2 位於樹林之山腳斷層十五號井(SCF-15)、十六號井(SCF-16)等鑽孔位置(朱聖心，2014)

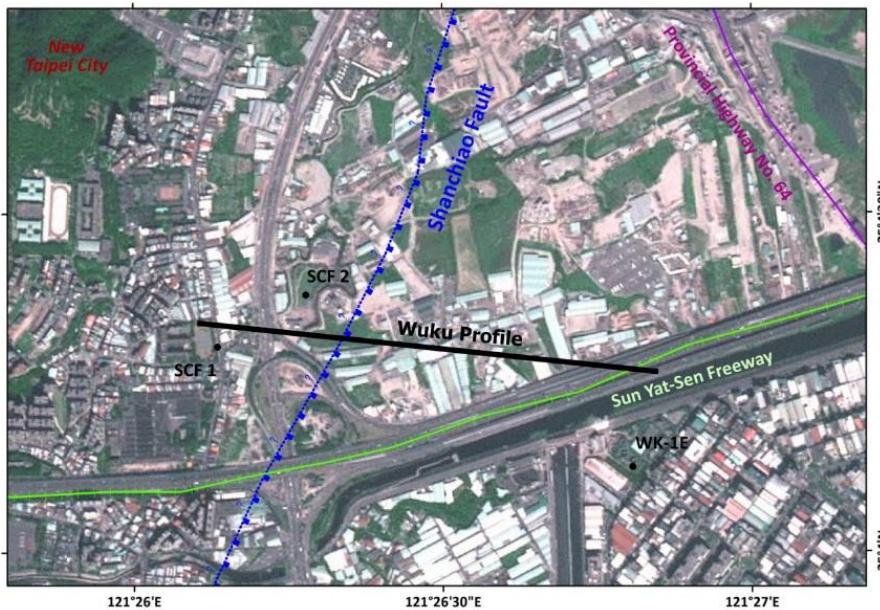


圖 2-3 位於五股之山腳斷層一號井(SCF-1)、二號井(SCF-2)等鑽孔位置(朱聖心，2014)

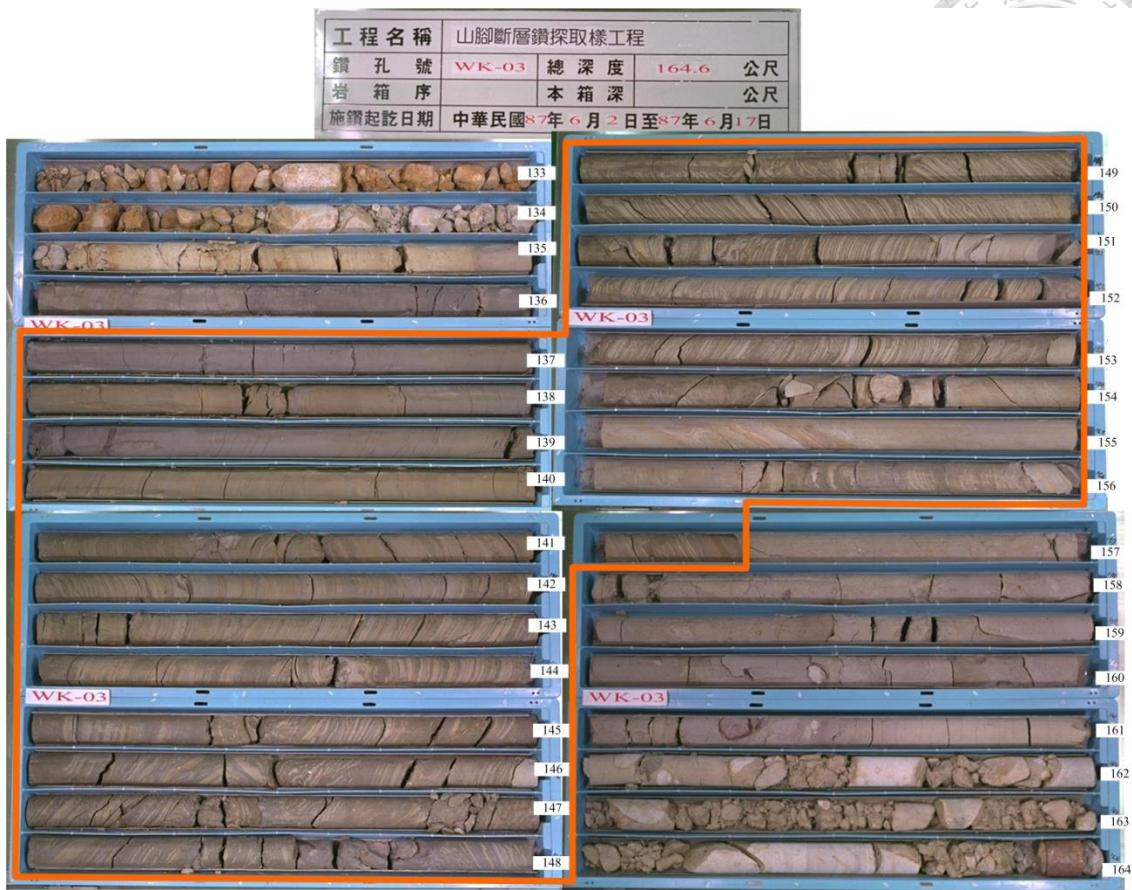
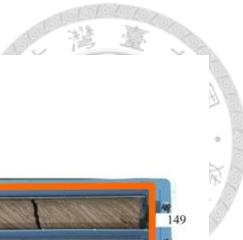


圖 2-4 山腳斷層二號井(SCF-2)鑽孔深度 137m 至 156.3m 處呈現層面傾斜及正斷層的小構造(朱聖心，2014)

表 2-1 以 PFDHA 年超越機率分析之斷層位移量(鍾春富、林銘郎，2004)

超越機率	方法			
	地震法			位移法
	x/L=0.05	x/L=0.25	x/L=0.5	
50 年內年超越機率 為 5%之位移量	0.04 m	0.06 m	0.07 m	0.92 m
50 年內年超越機率 為 2%之位移量	0.32 m	0.5 m	0.68 m	2.18 m



## 2.2 物理試驗

### 2.2.1 1g 模型試驗

Lee 等人於 2004 年進行 1g 及離心模型試驗，認為影響地表斷層跡的因素包括斷層種類、砂土密度、試驗砂層的厚度、斷層傾角等因素。於本研究中設計不同傾角、覆土厚度(以離心重力場模擬)及材料之正斷層，探討地表斷層跡及土中變形帶。

蔣佳興(2006)以正斷層砂箱試驗進行 1g 模型試驗。**表 2-2** 列出其研究所進行之四組不同傾角及覆土厚度之正斷層試驗。結果顯示，在低斷層傾角(30 度)，以及高斷層傾角(60 度)且高覆土層厚度(40cm)的情況下，會在上盤處產生反向斷層(antithetic fault)，與其他試驗不同。

朱聖心等人(2007；2013)及陳師賢等人(2007)利用砂箱試驗了解山腳斷層生長地層(growth strata)之沉積現象。實驗結果歸納出當正斷層錯動時，第一條剪切帶會比較陡直，第二條或第三條剪切帶相較於第一條剪切帶比較靠近下盤，傾角亦較緩；而當正斷層含有生長地層時，再次錯動後第一條發展的剪切帶，會沿原有最靠近下盤的剪切帶中繼續向上發展，且再次錯動引致之剪切帶發展至地表所需之基盤錯移率較小。

但以上之試驗材料皆以砂土為主，材料強度幾乎由摩擦角及安息角控制，不具有凝聚力，無法完整代表現地土壤之物理性質，故本研究以此考量，而使用黏土材料顆粒進行數值模擬。



表 2-2 不同條件之正斷層試驗(蔣佳興，2006)

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

## 2.2.2 離心機模型試驗

人工建物主要的變形破壞往往是由重力引致，故若設計一  $1/N$  之縮尺模型，並將其置入  $N$  倍地球重力加速度的環境中，模型材料受該重力加速度影響，模型中每一點的自重應力便可提高到與原型中相對應點之應力，受力行為可等同於原始模型。故將離心機試驗應用於斷層砂箱模型中，就可修正  $1g$  模型需考慮的尺寸效應。但有需耗費龐大經費之缺點。

國立中央大學進行可模擬重力環境的離心機砂箱試驗與定量數值模擬分析，試驗砂為石英砂，砂最大及最小乾單位重，由日本 JSFT26-81T 之試驗方法求得，其最大乾單位重為  $16.27(kN/m^3)$ ，最小乾單位重為  $13.52(kN/m^3)$ 。試體製作之相對密度，由此最大最小乾單位重計算求得。**表 2-3** 為試驗砂樣的基本物理性質；**圖 2-5** 為試驗用砂篩分析曲線。

張有毅(2013)以  $1g$ 、 $40g$ 、 $80g$  之重力場環境進行三組純砂離心正斷層之試驗。陳榮華(2013)進行黏土離心機正斷層之錯動試驗，共六組試驗如表 **2-4**，主要為純黏土不同強度及不同重力場之離心正斷層( $40gN_{test}32-C$ 、 $50gN_{test}36-C$ 、 $80gN_{test}37-C$ 、 $80gN_{test}38-C$ 、 $80N_{test}44-C-H$ )，另有一組砂黏土互層砂箱( $80gN_{test}59-S/C$ )。張庭傑(2014)同樣以離心機砂箱進行互層土壤之正斷層試驗，共三組( $70gN_{test}80-C5S5-H$ 、 $70gN_{test}81-C3S7-H$ 、 $70gN_{test}82-C5S5$ )，如表 2-5。



陳榮華與張庭傑之黏土材料皆參考 El Naggar et al.(2007)，以甘油混合皂土製作(見**圖 2-6**)，以避免試體受離心加速度時會排水而壓密。人工黏土共有兩種混合比例，以含油量(g/c)計算，分別為 40 % 和 34 %，其定義為甘油重除以甘油加皂土重。El Naggar et al.(2007)進行人工黏土之基本材料參數，如**表 2-3**，結論建議人工黏土極適合模擬軟至中等硬度的天然黏土。研究結果顯示，純黏土離心正斷層中，覆土層厚度增加(離心力增加)，會引致較寬廣的地表裂縫範圍，且在相同覆土層厚度下，較低強度的黏土，其地表裂縫範圍也較窄(見**圖 2-8 至圖 2-10**)。

陳榮華(2013)以相同離心重力場(80g)下，測量含油量  $g/c=40\%$  的試體之垂直於地表不排水剪力強度約為 46 kPa；而含油量  $g/c=34\%$  的試體，不排水剪力強度則約為 112 kPa。**圖 2-7** 說明試體受到離心重力場時，強度隨覆土深度及重力場之變化，由**圖 2-7** 可見不排水剪力強度隨覆土層深度增加而增加，含油量( $g/c=34\%$ )較低的試驗模型，如 80gNtest44-C-H 與 80gRtest46-C-H，其不排水剪力強度也明顯高於含油量( $g/c=40\%$ )較高的試驗模型。重力環境則對不排水剪力強度影響不大。此將做為本研究數值模擬之凝聚性覆土材料設計參數，但為簡化模型，於初始成果比對時，將黏土之強度不隨深度變化，而在生長地層時，才考慮深度對黏土強度的影響。

本研究將以國立中央大學地工離心實驗室之團隊成果，做為數值模型砂箱之初步成果判釋依據，驗證數值模型邊界設計及材料參數之正確性。

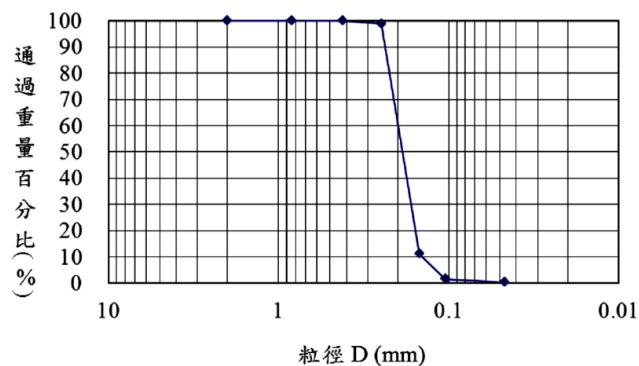


圖 2-5 No.306 石英矽砂粒徑分布圖(陳榮華，2013)



圖 2-6 離心機試驗用砂及人工黏土(陳榮華，2013)

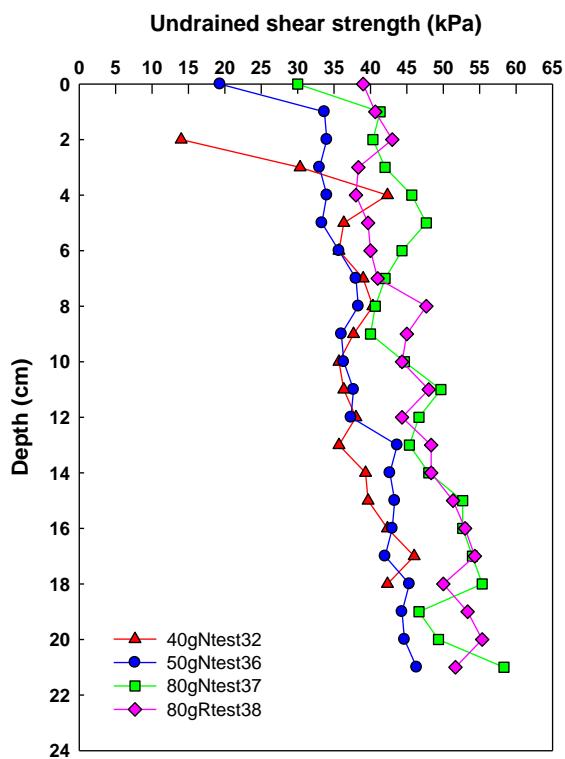
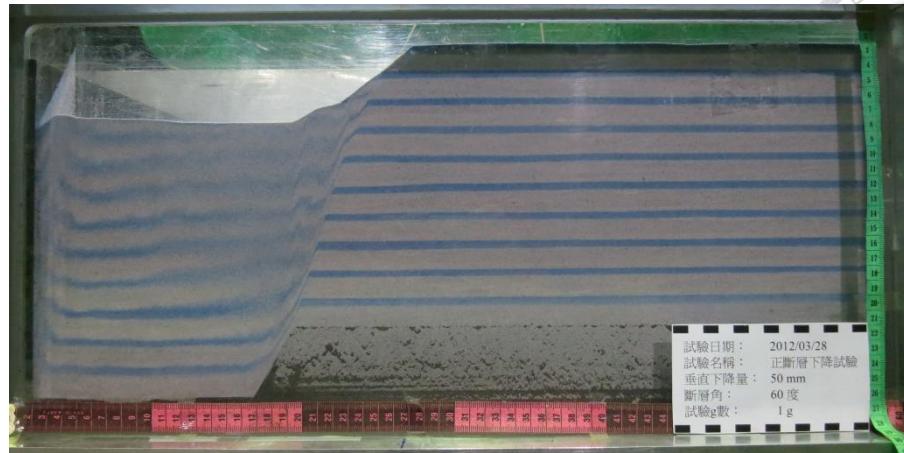
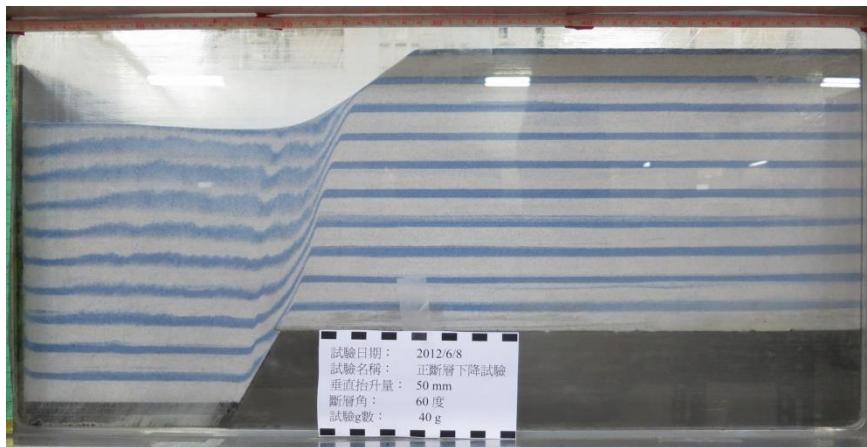


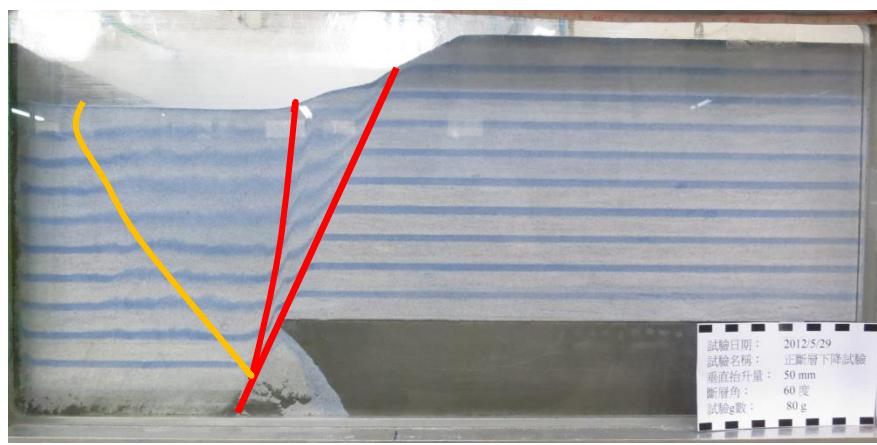
圖 2-7 黏土試體十字片剪不排水剪力強度與深度之關係(N40gNtest32-C、50gNtest36-C、80gNtest37、80gRtest38)(陳榮華，2013)



(a)



(b)



(c)

圖 2-8 不同離心加速度下純砂試體正斷層於錯動率 25% 時之側剖面。

(a)1g ; (b)40g ; (c)80g (張有毅 , 2013)

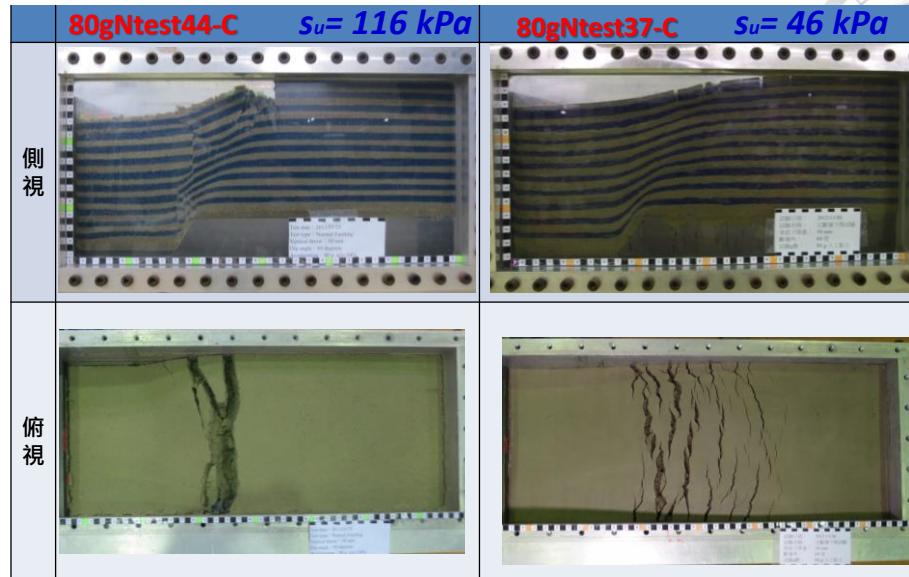


圖 2-9 不同剪力強度純黏土試體正斷層於錯動率 25% 時之側剖面。(陳榮華 , 2013)

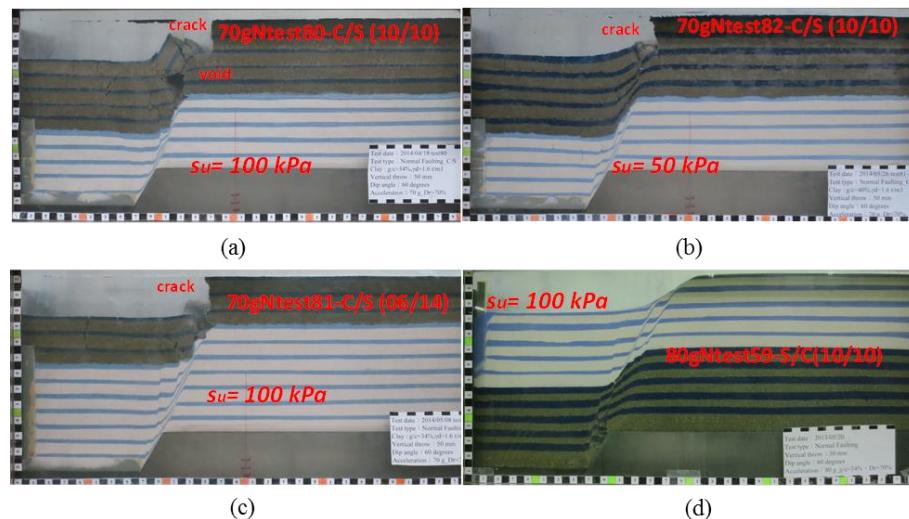


圖 2-10 不同土層正斷層錯動試驗於錯動率 25% 時之側剖面。  
 (a)70gNtest80-C/S ,  $s_u = 100\text{ kPa}$  ; (b)70gNtest82-C/S ,  $s_u = 50\text{ kPa}$  ;  
 (c)70gNtest81-C/S ,  $s_u = 100\text{ kPa}$ (張庭傑 , 2014) ; (d)80gNtest59-S/C ,  $s_u = 100\text{ kPa}$ (陳榮華 , 2013)



表 2-3 試驗砂土之基本物理性質(張有毅，2013、陳榮華，2013)

砂樣	石英砂砂
比重 $G_s$	2.65
平均粒徑 $D_{50}$ (mm)	0.193
有效粒徑 $D_{10}$ (mm)	0.147
尖峰摩擦角 $\varphi$ ( $Dr=40\%/70\%$ )	$35^\circ/41^\circ$
最大乾密度 $\rho_{dmax}(\text{g/cm}^3)$	1.66
最小乾密度 $\rho_{dmin}(\text{g/cm}^3)$	1.38
統一土壤分類	SP

表 2-4 人工黏土基本物理性質(El Naggar 等人，2007)

土樣	皂土混和甘油
比重 $G_s$	2.73
液性限度	50
塑性限度	39.5
塑性指數	10.5

表 2-5 陳榮華進行之離心機正斷層物理砂箱試驗(陳榮華，2013)

試驗編號	g 數	覆土材料及厚度 (原型尺寸)	對應之覆土厚度	黏土之 $s_u$
40gNtest32-C	40	黏土 0.2m	黏土 8m	37kPa
50gNtest36-C	50	黏土 0.2m	黏土 10m	38kPa
80gNtest37-C	80	黏土/0.2m	黏土 16m	46kPa
80Ntest44-C-H	80	黏土/0.2m	黏土 16m	116kPa
80gNtest59-S/C	80	砂 0.1m/黏土 0.1m	砂 8m/黏土 8m	107kPa

表 2-6 張庭傑進行之離心機正斷層物理砂箱試驗(張庭傑，2014)

試驗編號	g 數	覆土材料及厚度 (原型尺寸)	對應之覆土厚度	黏土之 $s_u$
70gNtest80-C5S5-H	70	砂 0.1m/黏土 0.1m	砂 7m/黏土 7m	95kPa
70gNtest81-C3S7-H	70	砂 0.06m/ 黏土 0.14m	砂 4.2m/ 黏土 9.8m	99kPa
70gNtest82-C5S5	70	砂 0.1m/黏土 0.1m	砂 7m/黏土 7m	62kPa



### 2.2.3 生長斷層試驗

朱聖心等人(2007；2013)利用砂箱試驗(圖 2-11)搭配數值模擬，設計模擬了解山腳斷層生長地層(growth strata)之沉積現象。實驗砂為越南石英砂，礦物組成99%以上為石英，其粒徑分佈主要為40 至 140 號篩之間，為均勻級配，由基本物理性質實驗，得平均砂土比重  $G_s$  為 2.65，土壤單位重為  $15.7 \text{ kN/m}^3$ ，控制其相對密度為 55%，孔隙比為 0.68。砂箱寬度 1 米，總覆土厚 0.2 米，斷層尖端位於砂箱中央，距離左右邊界各 0.5 米。

實驗結果(圖 2-12 及 圖 2-13)歸納出當正斷層錯動時，第一條剪切帶會比較陡直，第二條或第三條剪切帶相較於第一條剪切帶比較靠近下盤，傾角亦較緩；而當正斷層含有生長地層時，再次錯動後第一條發展的剪切帶，會沿原有最靠近下盤的剪切帶中繼續向上發展，且再次錯動引致之剪切帶發展至地表所需之基盤錯移率較小。

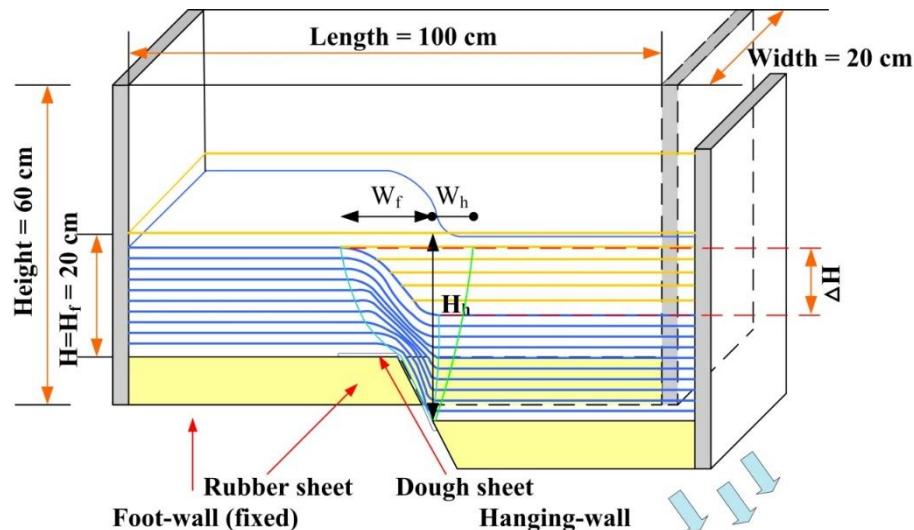


圖 2-11 生長正斷層砂箱試驗示意圖(朱聖心，2014)

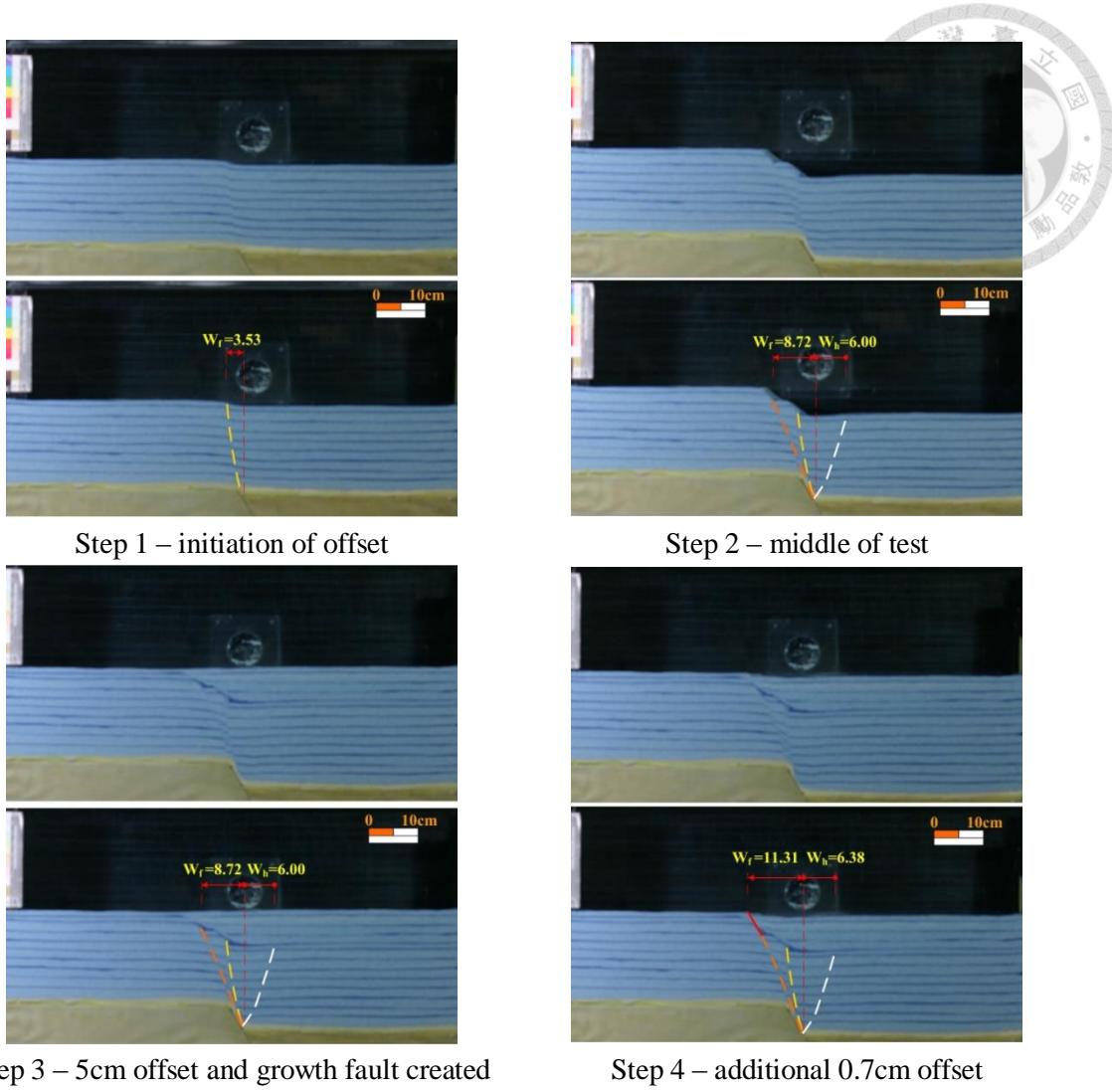


圖 2-12 生長正斷層砂箱模型之剪切帶發展現象及數據描繪(朱聖心, 2014)

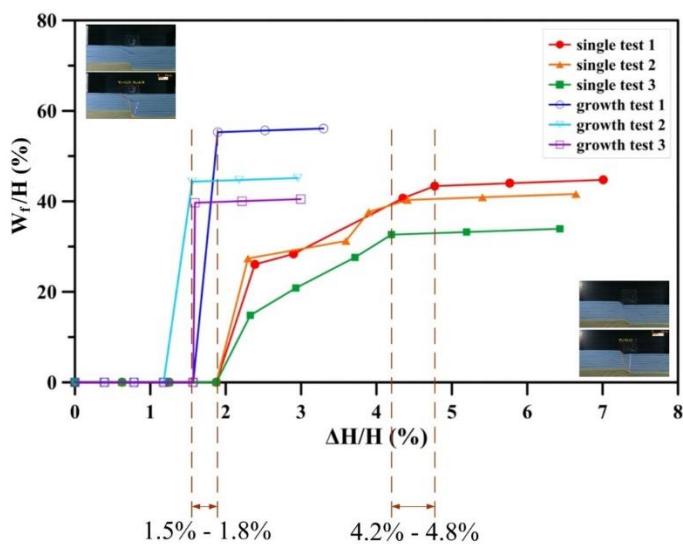


圖 2-13 生長正斷層與無生長斷層砂箱模型之剪切帶發展(朱聖心, 2014)



## 2.3 數值模擬

### 2.3.1 材料參數

Itasca(2004)於 PFC2D 之使用手冊中說明，PFC2D 內可允許顆粒間存在接觸鍵結模式或平行鍵結模式。接觸鍵結模式是使兩顆粒元素之間的接觸點存在正向及切向強度，接觸點面積為極小，可忽略之，正向及切向強度之單位為力，故可表現土壤的凝聚力(adhesion)；正向鍵結模式則是較適合模擬岩石材料，因其是在顆粒元素間另外建立一塊體材料，該塊體材料具有正向及切向強度，受力後會產生變形，且可承受彎矩，相當於岩石材料間的額外材料，即基質(cementation)。

中央地調所(2013)以 PFC2D 進行凝聚性土壤的直剪試驗，PFC2D 內可設定兩種鍵結模式，分別為平行鍵結及接觸鍵結，其中之差異將於第三章中討論。該模擬試驗使用上述之兩種鍵結模式，模擬具凝聚性之土壤，觀察其材料之力學參數與微觀參數之關係。其結果說明平行鍵結試體於直剪模擬分析之結果而言，其摩擦角顯得過大，其原因可能為平行鍵結與滑動模式容許同時存在，較不符合土壤之力學行為；以接觸鍵結模擬具凝聚力材料之結果看來，如表 4.3.2 所示，其  $c$  及  $\phi$  值較為合理，且摩擦角  $\phi$  不如平行鍵結之角度大，如同前述，接觸鍵結模式與滑動模式僅能同時存在一種模式，與真實土壤受剪之行為較為類似。(表 4.3.2 於滑動模式下之微觀參數與表 4.3.1 所列相同)。

中央地調所(2014)之《重要活動斷層構造特性調查研究--活動斷層近地表變形特性研究》中，亦以 PFC2D 進行模擬砂土材料，做法為控制試體中某一定比例的顆粒，使之無法旋轉，但仍可自由位移。此作法係因 PFC 程式內建之顆粒只能為圓形(無論是圓球或是圓柱)，而真實之砂顆粒則是具有稜角形狀，當顆粒受剪動時，其稜角會產生互鎖效應(interlocking)，稜角形狀越明顯，砂土材料之巨觀摩擦角便會較高。控制顆粒不可旋轉後，進行直剪數值模擬，其得到的砂土巨觀



摩擦角會隨控制旋轉比例不同而所變化，當控制不可旋轉的顆粒比例增加時，砂土巨觀摩擦角也隨之增加，最大可以模擬至摩擦角為 60 度，其成果請見圖 2-16 及表 2-6。

由以上之文獻回顧，本研究於離心正斷層砂箱模擬中，對於砂土材料，以控制砂箱內顆粒的旋轉比例，模擬不同摩擦角的砂土，對於黏土材料，則使用正向鍵結模式模擬其凝聚力，並觀察不同覆土材料於正斷層中錯動之變形行為，詳細成果將於第 5 章討論。

表 4.3.1 平行鍵結模式模擬具凝聚力材料之微觀參數與力學參數關係表(中央地調所，2013)

輸入參數 (Pa/m)	pb_kn=3.6×10 <sup>6</sup>	pb_kn=7.2×10 <sup>7</sup>	pb_kn=1.8×10 <sup>7</sup>	pb_kn=3.6×10 <sup>8</sup>
正向及切向勁度(N/m)	pb_ks=1.2×10 <sup>6</sup>	pb_ks=2.7×10 <sup>7</sup>	pb_ks=6×10 <sup>7</sup>	pb_ks=1.2×10 <sup>8</sup>
K <sub>n</sub> =3.6×10 <sup>6</sup>	c=6.39kPa	c=15.34kPa	c=37.8kPa	c=44.24kPa
K <sub>s</sub> =1.8×10 <sup>6</sup>	ϕ=37.6°	ϕ=39.41°	ϕ=38.85°	ϕ=44.23°
μ=0.24				

表 4.3.2 接觸鍵結模式模擬具凝聚力材料之微觀參數與力學參數關係表(中央  
地調所，2013)

輸入參數(N) 粒徑尺寸	n_bond=0 s_bond=0	n_bond=0.1 s_bond=0.1	n_bond=1 s_bond=1	n_bond=5 s_bond=5
0.5(mm)	c=9.57kPa $\phi=15.37^\circ$	c=8.1kPa $\phi=18.00^\circ$	c=13.41kPa $\phi=13.34^\circ$	c=46.16kPa $\phi=16.55^\circ$

### 2.3.2 1g 斷層模擬

蔣佳興(2006)利用有限元素分析軟體(ABAQUS)進行小尺寸數值模擬分析，並且與試驗模型進行比對，結果顯示砂箱試驗之剪切帶與數值分析之塑性應變帶相當一致；將數值分析擴展至全尺寸，將其初步應用於現地剖面，進行全尺寸數值模擬。但因 ABAQUS 為連體力學分析，只能顯示土體受力後之應變，雖能設定黏土材料，卻無法觀察其破壞機制。

### 2.3.3 離心機斷層模擬

張有毅進行離心力場為 1g、40g、80g 的正逆斷層物理砂箱試驗。其斷層傾角為 60 度，砂箱總寬度為 1 米，1g 狀態下覆土厚為 0.2 米。提出在不同斷層垂直錯動量下，其地表變形的發展及地下破裂跡之演育。同時，張有毅也以 PFC2D 進行數值模擬，所得傾角為 60 度的正斷層或逆斷層，錯動後之地表變形剖面與離心模型的試驗結果一致。再利用此組微觀參數，進行不同斷層傾角的正斷層及逆斷層錯動的數值模擬，建立地表變形剖面及評估影響範圍。

於逆斷層模型中，張有毅提出以 Gompertz function 模擬不同斷層傾角時，在不同垂直錯動量下之地表變形剖面(見圖 2-14 及圖 2-15)。將圖 2-14 之地表顆粒座標，輸入 Gompertz function，可耦合得出不同的斷層傾角之地表變形剖面，迴歸



得到不同的地表剖面參數，則可估計不同斷層傾角錯動後地表的變形剖面及影響範圍。但因正斷層在低傾角時因產生地壘，不能以 Gompertz function 進行耦合，故本研究延伸提出一篩選邏輯，以非人工判釋、較客觀之角度歸納出正斷層之地表變形帶寬。

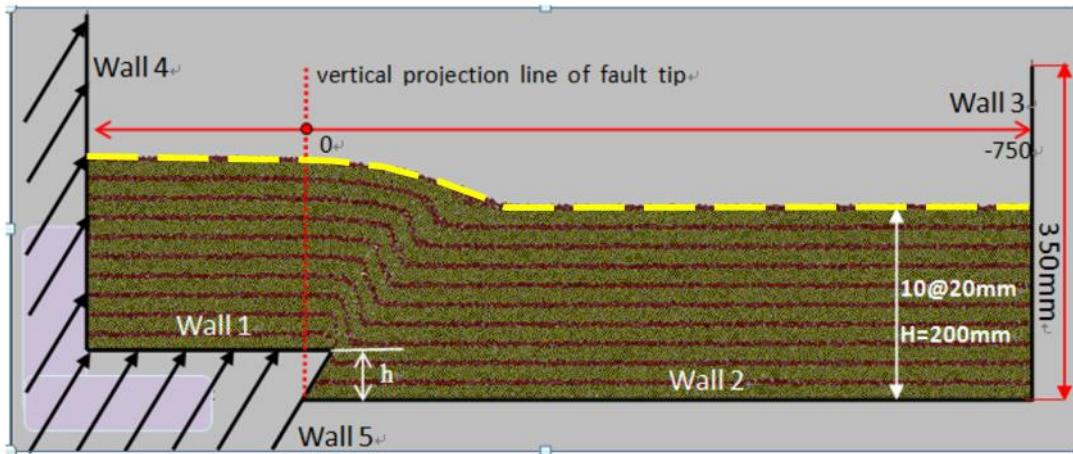


圖 2-14 純砂逆斷層之地表變形剖面示意圖(張有毅，2013)

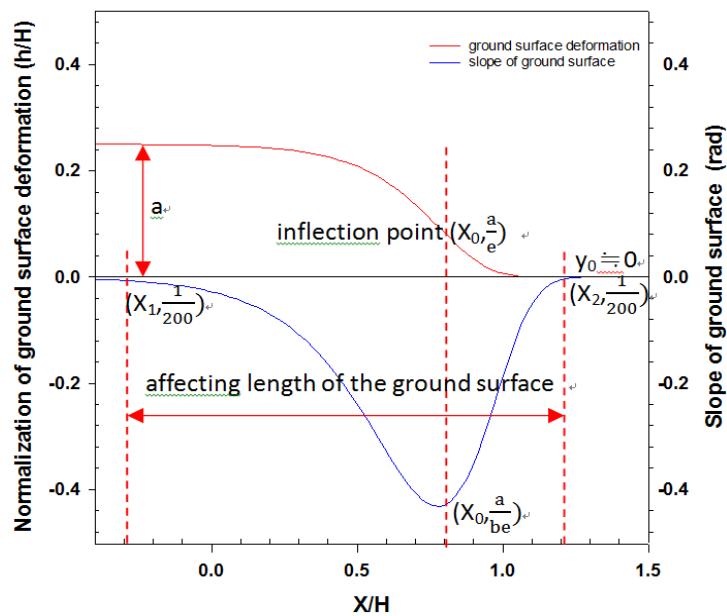


圖 2-15 以 Gompertz 函數耦合逆斷層錯動之地表變形剖面(張有毅，2013)

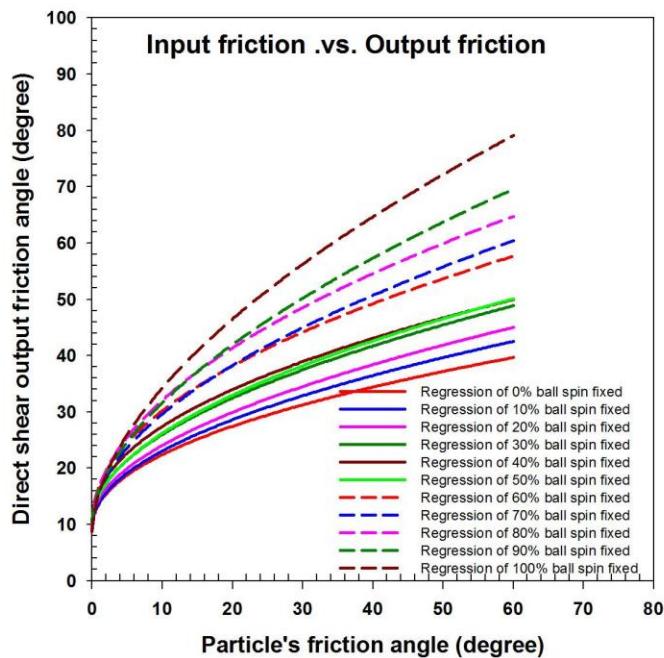


圖 2-16 顆粒摩擦係數及固定旋轉比例對巨觀砂土摩擦角之影響(中央地調所，2014)

固定顆粒 不可旋轉比例	巨觀砂土 摩擦角	固定顆粒 不可旋轉比例	巨觀砂土 摩擦角
0%	33.2°	60%	47.3°
10%	35.1°	70%	48.5°
20%	36.9°	80%	52.3°
30%	40.1°	90%	54.6°
40%	40.9°	100%	61.4°
50%	41.5°		



### 2.3.4 生長斷層模擬

朱聖心(2014)使用 PFC2D 進行正斷層之生長地層模擬，其模型尺寸同物理砂箱，寬度 1 米，總覆土厚 0.2 米，斷層尖端位於砂箱中央，距離左右邊界各 0.5 米。顆粒粒徑為 0.6 至 1 米。朱聖心先建立簡單之生長地層模型(見圖 2-17)，與其物理試驗比對，而後增加生長及錯動次數，進行山腳斷層樹林剖面及五股剖面之模擬。五股剖面之數值模擬成果(見圖 2-18)，可見於斷層尖端附近之剪動帶內，存在傾斜層面及正斷層的局部構造，與鑽探調查結果符合。

但為模擬現地覆土厚度及應力，五股剖面之生長地層次數高達 205 次，模型運作時間極長，一組試驗成果需兩個月才能運算完成，本研究使用離心機模擬，可減少球顆粒之數量，提高運算速度，且亦能反應高覆土之土體應力，使破壞機制更符合真實情形。

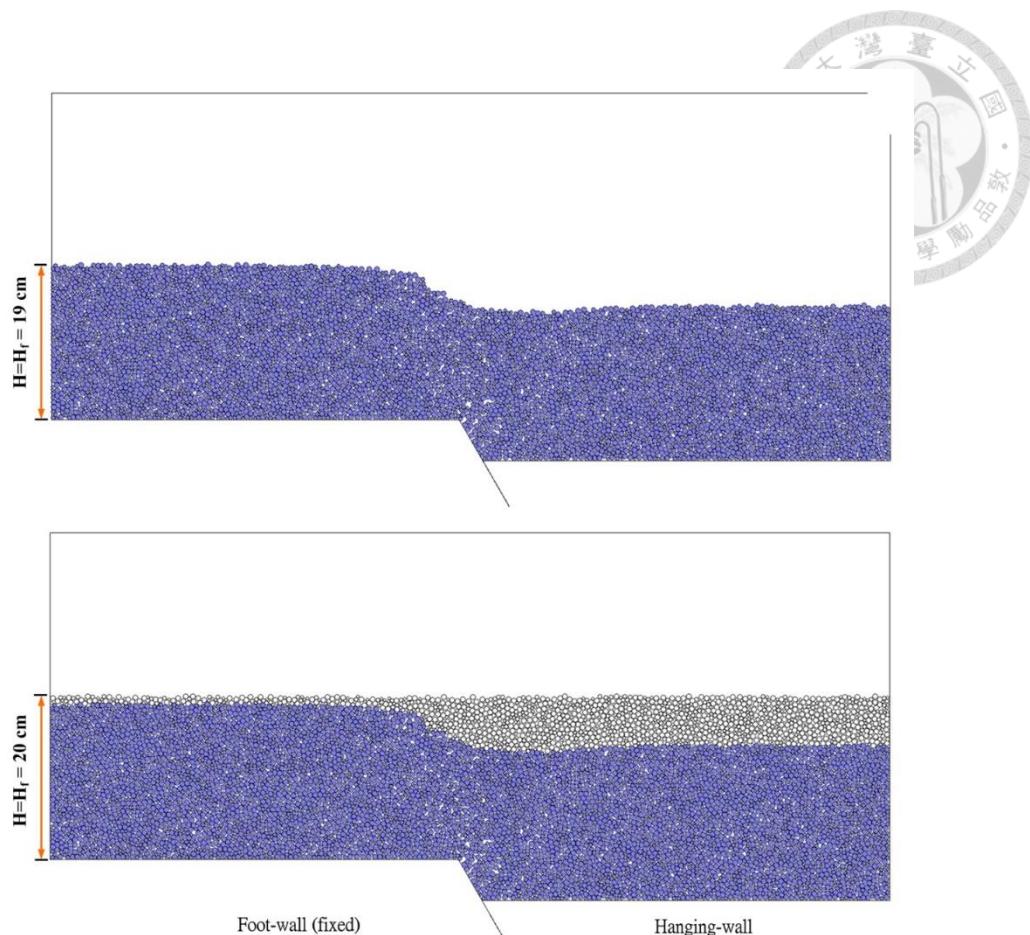


圖 2-17 以 PFC2D 建置之生長正斷層砂箱模型(朱聖心，2014)

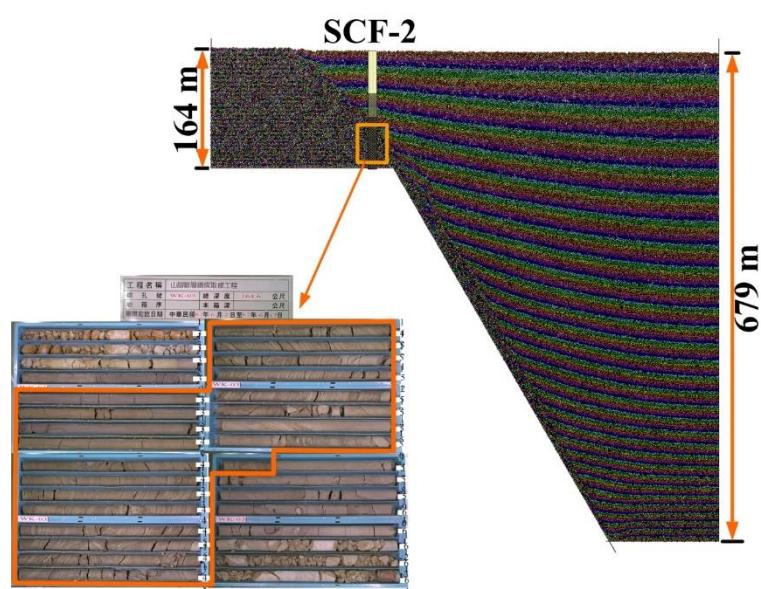
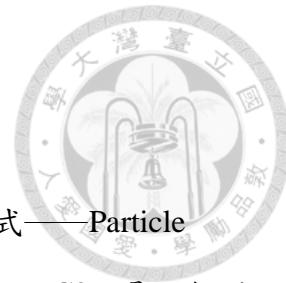


圖 2-18 五股剖面的數值分析模型與 SCF-2 鑽井之層面傾斜及正斷層小構  
造比對(朱聖心，2014)



## 第3章 研究方法

本研究採用 Itasca Consulting Group 發展之非連續體分析程式——Particle Flow Code 2 Dimension—進行數值模擬，以下將簡稱為 PFC2D。PFC2D 是以個別元素法為計算理論基礎的二維數值模擬軟體，軟體中可生成圓形狀的顆粒元素及牆元素，以牛頓第二運動定律計算其平衡力、位移與元素間接觸力等，當顆粒運動後，可經由計算接觸點上的接觸力得知其變化，以描述模型內顆粒的力學行為。以下將針對個別元素法、PFC2D 內的計算原理及顆粒元素的組成及鍵結模型進行介紹。

### 3.1 個別元素法

個別元素法(distinct element method)為離散元素法(discrete element method)之延伸，後者由 Cundall 於 1971 年提出，用以模擬岩石塊體之漸進式破壞，而後更運用於模擬堆積材料力學行為(Cundall and Strack, 1979)。不同於一般傳統連體力學，此分析方法主要針對顆粒材料或具有不連續形體的力學問題。模型分析中，可紀錄模型中每個組成元素的運動行為，以牛頓第二運動定律計算其平衡力、位移與元素間接觸力等。而個別元素法與離散元素法的差異在於多了時階之觀念，且將分析元素設為顆粒而非塊體，時階為每個運算步驟的計算單位，為一個時間間距，在此時間間距內，依照球元素接觸點之組成模型，計算各個球元素的位置與相鄰球元素之重疊量及相對位移，同樣代入牛頓第二運動定律計算顆粒間的不平衡力。



## 3.2 數值模擬工具

### 3.2.1 計算原理

PFC2D 內採用個別元素法進行顆粒堆積之計算分析，數值模型中，每一個顆粒的移動方向及位移可獨立計算，且假設力與位移作用只顆粒間接觸點或顆粒表面發生。程式設定顆粒屬半剛體，即顆粒間的接觸採軟接觸型式，以正向彈簧勁度模擬接觸勁度，當顆粒運動後，可經由計算接觸點上的接觸力得知其變化，反推下一個時階的顆粒位置及受力，以描述模型內顆粒的力學行為。

PFC2D 在運算過程中採取外顯有限差分法(explicit finite difference method)，將真實時間切割成細小的間距，稱為時階(time step)。時階為每個運算步驟的計算單位，為一個時間間距，在此時間間距內，依照球元素接觸點之組成模型，計算各個球元素的位置與相鄰球元素之重疊量及相對位移，同樣代入牛頓第二運動定律計算顆粒間的不平衡力，計算完成一個循環週期。而後重覆運算至人為指定步數或模型達到穩定狀態。**圖 3-1** 為 PFC2D 數值軟體之運算循環流程，而在 PFC2D 運算中的基本假設包括以下六點(Itasca, 2004)：

1. 基本元素皆令為剛體。
2. 元素間的接觸點間具有一個極小且可忽略的區域。
3. 接觸點為軟接觸，即允許相鄰的兩個元素之接觸點重疊。
4. 接觸勁度會影響相鄰兩個元素的重疊量和接觸力，重疊量和接觸力可以力與位移關係式求得，且所有的重疊量皆遠小於顆粒尺寸。
5. 顆粒元素之間的接觸點可以設置鍵結模型。
6. 所有的顆粒元素都是球形(2D 程式中可設定為圓盤或是非圓盤)。

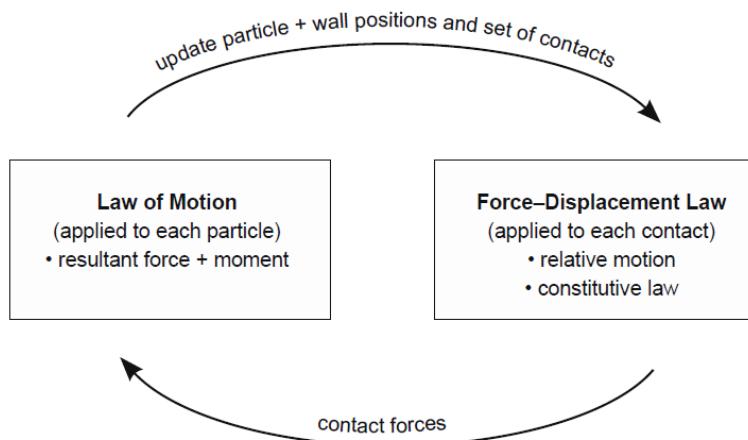


圖 3-1 PFC 數值軟體之運算循環流程(Itasca, 2004)

### 3.2.2 組成模型

PFC2D 數值軟體之模型是由球顆粒與牆兩種元素所組成，元素本身視為半剛體，即顆粒不容許變形，但顆粒間接觸部分容許部分的互相重疊，此接觸的部分稱作接觸點(contact)，模型內所有的接觸點力學行為，會控制整個系統模型的運動現象。

接觸點之組成模型包含(1)勁度模型(stiffness model)、(2)滑動模型(slip model)以及(3)鍵結模型(bonding model)。勁度模型令接觸力和其產生之位移為彈性關係；滑動模型是指二個互相接觸的顆粒之間，其切向接觸力和正向接觸力會產生相對滑移，可控制滑動顆粒間的滑動行為；鍵結模型則可設定顆粒間的鍵結強度，使顆粒與顆粒之間具有凝聚性，又有接觸鍵結模型(contact bond)及平行鍵結模型(parallel bond)。兩種鍵結模型之鍵結方向都可分為正向(兩顆粒質心相連方向)及切向，但後者具有抗彎矩之能力。當鍵結斷裂時，兩顆粒便為獨立之元素。本研究後續的數值模擬所採用的接觸點之組成模型為勁度模型以及鍵結模型。

接觸勁度為顆粒之間接觸力和其產生之位移之彈性關係。正向勁度表示總正向力與總正向位移間的變形係數，正向勁度表示割線勁度，如式3.2-1所示：



$$F_i^n = K^n U^n n_i \quad \text{式 3.2-1}$$

切向勁度為顆粒之間切向接觸之分力增量與切向位移增量間的變形係數，切向勁度則取切線勁度，如式 3.2-2：

$$\Delta F_i^s = -K^s U^s \quad \text{式 3.2-2}$$

PFC2D 程式內建有線性模型(linear model)及簡化 Hertz-Mindlin 模型(simplified Hertz-Mindlin model)兩種接觸模型，本研究採用前者，人為給定兩接觸顆粒間之正向勁度與切向勁度，並令兩顆粒之接觸勁度為彈簧串聯。則正向割線接觸勁度  $K^n$  (contact normal secant stiffness) 與切向切線勁度  $K^s$  (contact shear tangent stiffness) 將可寫成式 3.2-3、式 3.2-4 所示

$$K^n = \frac{k_n^{[A]} k_n^{[B]}}{k_n^{[A]} + k_n^{[B]}} \quad \text{式 3.2-3}$$

$$K^s = \frac{k_s^{[A]} k_s^{[B]}}{k_s^{[A]} + k_s^{[B]}} \quad \text{式 3.2-4}$$

上式之[A]與[B]分別表示接觸之兩顆粒。又於線性模式中，正向切割勁度等於正向切線勁度，故得下式：

$$k^n = \frac{dF^n}{dU^n} = \frac{d(K^n U^n)}{dU^n} = K^n \quad \text{式 3.2-5}$$

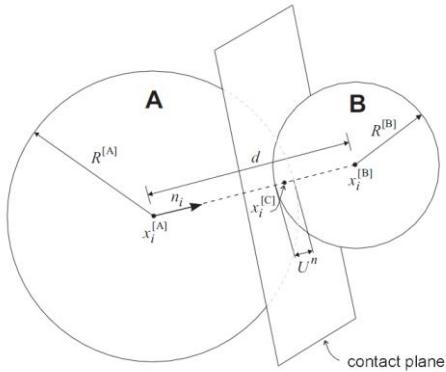


Figure 1.2 Notation used to describe ball-ball contact

圖 3-2 球與球之接觸模式(Itasca ,

2004)

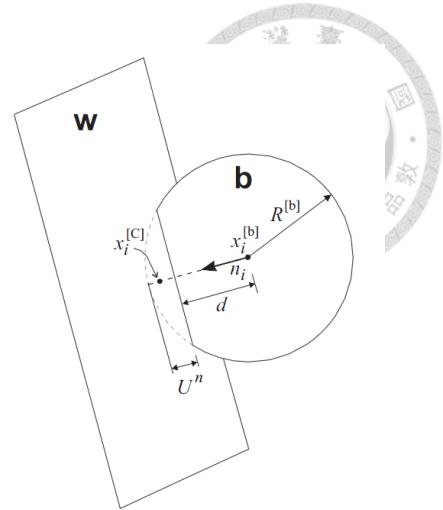


Figure 1.3 Notation used to describe ball-wall contact

圖 3-3 圖牆與球之接觸模式(Itasca ,

2004)



### 3.2.3 鍵結模型

鍵結模型則可設定顆粒間的鍵結強度，使顆粒與顆粒之間具有凝聚性，又有接觸鍵結模型(contact bond)及平行鍵結模型(parallel bond)。兩種鍵結模型之鍵結方向都可分為正向(兩顆粒質心相連方向)及切向，但後者具有抗彎矩之能力。當顆粒之間的作用力超過鍵結的強度時，鍵結會斷裂，兩顆粒便為獨立之元素。鍵結模型為PFC 程式內部的其中一種接觸點之組成模型，設定鍵結模型可以使兩個球顆粒彼此間存在鍵結，則鍵結將會斷裂。

前述提及 PFC 內的鍵結模型又分成接觸鍵結模型及平行鍵結模型(見**圖 3-4** 及**圖 3-5**)，前者是在顆粒之間給予正向及切向強度(單位為力)，當顆粒間之受力運算後超越該強度，便會發生張力或是剪力破壞。後者則是顆粒之間以一圓柱狀的基質物體黏合(強度單位為應力)，且基質除了可傳遞力以外，亦可承受彎矩(moment)。設定鍵結模型後，若運算過程中，顆粒之間的受力都小於鍵結強度，則鍵結不會發生破壞，且鍵結只能設定在顆粒與顆粒之間，牆與牆或是顆粒與牆之間並不會存在鍵結。

本研究採用接觸鍵結模型用以模擬黏土性材料於離心機斷層砂箱之產狀，主要考量為黏土相較於岩石，其抗彎矩凝力較弱，且以模型產狀及斷鍵破裂形式比對，發現以接觸鍵結模型模擬具有黏土覆土材料之正斷層較為符合，詳細將於第 4 章介紹。接觸鍵結模型又分為正向強度及切向強度(見**圖 3-5**)，正向為兩顆粒之質心連線方向，強度的單位為力，當顆粒間受拉力，且該值大於正向強度時，顆粒之間產生張力破壞，當顆粒間受壓力，且該值大於切向強度時，顆粒之間產生剪力破壞，詳見**圖 3-6** 及**圖 3-7**。

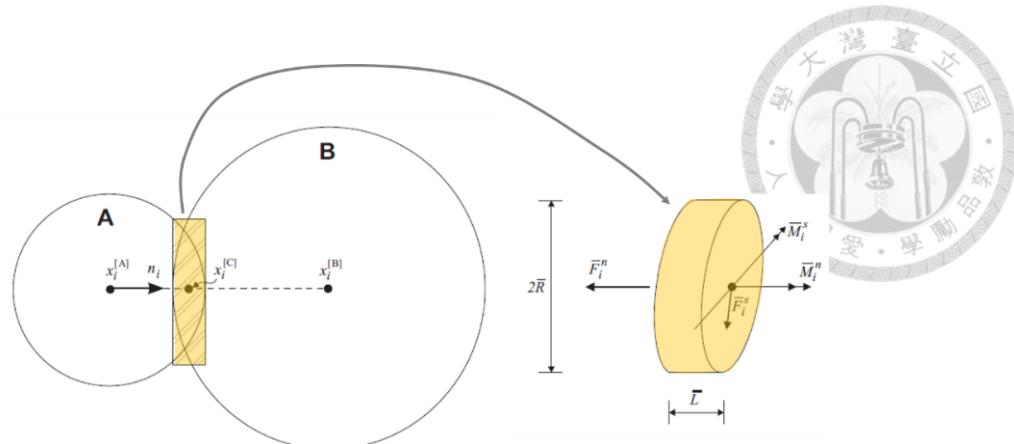


Figure 2.2 Parallel bond depicted as a cylinder of cementitious material

圖 3-4 平行鍵結(parallel bond)之示意圖(Itasca , 2004)

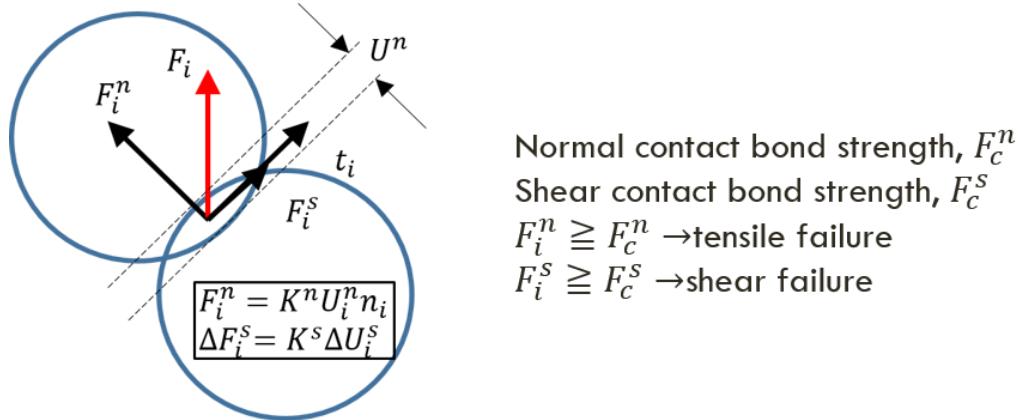


圖 3-5 接觸鍵結(contact bond)之示意圖(Itasca , 2004)

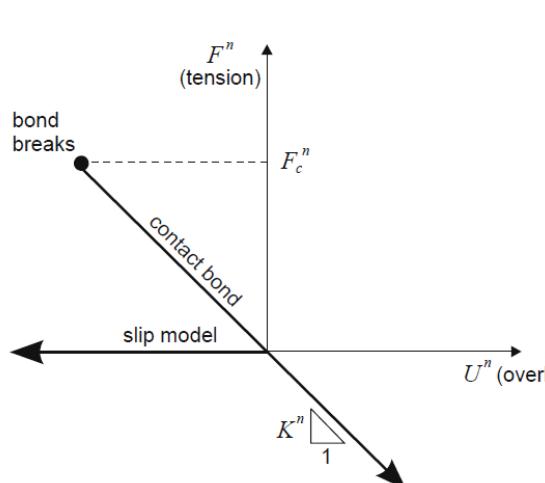


圖 3-6 接觸鍵結之張力破壞(Itasca , 2004)

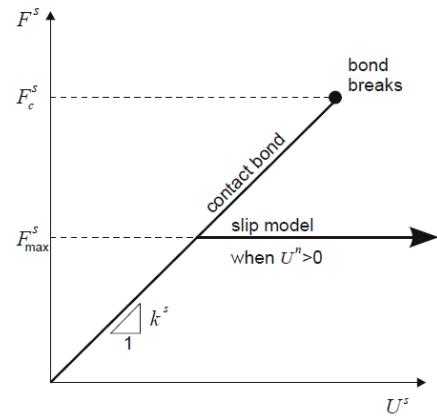


圖 3-7 接觸鍵結之剪動破壞  
(Itasca , 2004)



## 第4章 數值模型建立

### 4.1.1 邊界條件設計

人工建物主要的變形破壞往往是由重力引致，故若設計一  $1/N$  之縮尺模型，並將其置入  $N$  倍地球重力加速度的環境中，模型材料受該重力加速度影響，模型中每一點的自重應力便可提高到與原型中相對應點之應力，受力行為可等同於原始模型。故將離心機試驗應用於斷層砂箱模型中，就可修正  $1g$  模型需考慮的尺寸效應。但有需耗費龐大經費之缺點。數值工具具有方便使用、可建立力學計算基礎、高經濟效益等優點，但應注意其輸入之邊界條件、參數需具有一定之可信度，故初步之數值驗證便極為重要。

本研究採用 Itasca Consulting Group 發展之非連續體分析程式，採用個別元素法計算每一時階之系統內受力變化。時階可由使用者自行定義，但不宜過大，本研究之使用值介於 0.001 至 0.0001 秒，建議不大於 0.001 秒，否則系統內的元素平均不平衡力會過大，易呈現不合真實情況之運算(見**圖 4-1**)。每個運算時階內，程式會預先偵測系統內所有顆粒位置及受力、牆位置及受力，藉由設定之接觸模式及鍵結模式微觀參數計算下一個時階的顆粒位置及受力、牆位置及受力。以此類推，達到模擬真實材料應力傳遞及變形之行為。

依照前人之研究成果，本研究之模擬設計最大可至  $80g$  重力環境的純砂模型及純黏土模型，二維數值模擬砂箱於  $1g$  狀態下，其寬為 1 米，覆土深 0.2 米，斷層尖端位於底牆中央，距離左右邊界各 0.5 米。以 PFC 程式內的牆做為基盤及邊界，如**圖 4-2**。斷層為一次錯動完成，錯動率  $r$  為上盤之垂直位移量  $h$  除以總覆土厚  $H$ ，當錯動率達到 25% 時停止，再觀察其地表及土中變形。左右邊界牆之摩擦係數給定為零，以避免邊界旁的顆粒受到摩擦力拖移而引至預期外的變形。基盤與斷層面之牆皆給定摩擦係數等於 0.484。



模型之牆內會生成覆土顆粒，重力貢降平衡後給予分層分色，一做為變形判釋效果，二係因球顆粒間的正向及切向勁度應隨覆土深度而增加，以避免基盤附近的球顆粒因過度擠壓而穿牆，造成不合理之現象。覆土顆粒分為厚層及薄層，厚層為 0.018 米，薄層為 0.002 米，自底部厚薄交錯各鋪設 10 層，總厚度為 0.2 米，共 28759 個顆粒。砂土為顆粒全部無鍵結，黏土為層內顆粒有鍵結，層與層之間的顆粒無鍵結，對應物理離心機試驗鋪設多層黏土時，層間形成為相對弱面。二維數值模擬砂箱於  $1g$  狀態下，其寬為 1 米，覆土深 0.2 米，斷層尖端位於底牆中央，即距離左右邊界各 0.5 米。 $1g$  狀態下重力平衡後，再加大重力至物理離心機試驗之  $g$  數，確認數值模擬中底牆承受之力等同於物理離心機底牆之力，便開始錯動。

前述提及球顆粒間的正向及切向勁度應隨覆土深度而增加，本研究參考張有毅(2013)之經驗，巨觀的束制模數， $M$ ，與圍束應力或有效垂直覆土應力( $\sigma_z$ )的經驗關係式，可以利用下式來表示：

$$M = N\sigma_z^m \dots \text{式 3.3-1}$$

其中  $N$  為常數， $m$  為經驗值，一般而言介於 0.4~0.5 間。

張有毅以 PFC2D 進行自重壓密試驗，欲先設定  $K_n = 0.58 \times \frac{10^7 N}{m}$ ,  $\frac{K_n}{K_s} = 3$ ，及  $\mu = 0.466$ ，結果顯示隨著  $K_n$  的增加 (m 減少)，地表沈陷量逐漸減少，當  $m=0.4$  可以得到最佳的符合程度。故本研究同樣以  $m=0.4$  做為冪次函數，建立數值模型模擬離心正斷層的試驗成果。

PFC2D 內可直接設定重力之方向及數值，故本研究假設 1g 狀態之重力加速度為  $9.81 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$ ，直接將欲放大之重力倍數乘以 1g 狀態，即採加大重力的方式，進行離心機模擬。圖 4-5 為砂箱模型於未錯動時，上下盤所承受之應力與計算理論值之比較，本研究參考之物理試驗砂單位重為  $15.7 \text{ kN}/\text{m}^3$ ，在 1g、10g、20、30g、40g、50g、60g、70g、80g 之重力環境下，對應的覆土厚度為 0.2 米、



2米、4米、6米、8米、10米、12米、14米、16米，應力計算理論值依序為  
3.14kPa、31.4kPa、62.8kPa、78.5kPa、94.2kPa、125.6kPa、157.0kPa、  
188.4kPa、219.8kPa、235.5kPa、251.2kPa，而實際量測數值模型之上盤及下盤(上  
下盤定義見**圖 4-2**)應力分別是 3.1kPa/3.0kPa、30.8kPa/30.5kPa、  
61.4kPa/61.2kPa、92.0kPa/91.8kPa、122.7kPa/122.6kPa、153.3kPa/153.1kPa、  
184.0kPa/183.8kPa、214.6kPa/214.5kPa、245.2kPa/245.1kPa，誤差不超過 5%，故  
認為數值模型以加大重力的方式模擬離心機模型為可行之方式。

因本研究預期進行不同覆土材料之斷層模型，故以覆土材料及其深度做為模  
型之命名(**圖 4-3 及圖 4-4**)，如 N60g20S10、N60g20C10、N60g20C5S5，字母 N  
表示為正斷層(normal fault)，後連接的數字代表斷層面與水平面之夾角，即斷層  
傾角；字母 g 加數字代表模擬之離心場環境，如 g20 表示受到的離心力為 20 倍  
的重力加速度，於此數值模型中可模擬  $20 \times 0.2 = 4$  米之覆土應力；字母 S 為砂質材  
料，顆粒間無鍵結；字母 C 代表凝聚性材料，字母 C 後若有字母 H 表示高強度  
(high strength)，於前人物理離心試驗中，C-5 表示為不排水剪力強度等於  
100kPa；S/C 則表示上層為黏土層(clay layer)，下層則為砂土層(sand layer)，是以  
黏土覆蓋砂土之互層土層；覆土材料後之數字係指其深度之比例，如 S10 為純砂  
質覆土，C3S7 表示黏土覆蓋砂土，且其深度比例為 3 比 7，1g 狀態下，黏土佔  
 $0.2 \times 0.3 = 0.06$  米，砂土佔  $0.2 \times 0.7 = 0.14$  米。

本研究以國立中央大學土木工程學系李崇正老師所屬之離心地工實驗室之物  
理離心機斷層斷錯試驗為基準，進行初步數值模擬，與物理試驗進行比對，確認  
數值模型之可行性及準確性後，再進一步改變斷層傾角、覆土深度、材料參數(砂  
土摩擦角、黏土單壓強度)進行大規模(數目)之數值砂箱模擬，彌補物理離心試驗  
需耗費昂貴經費、時間及無法追蹤特定位置之土體破壞機制等缺點。

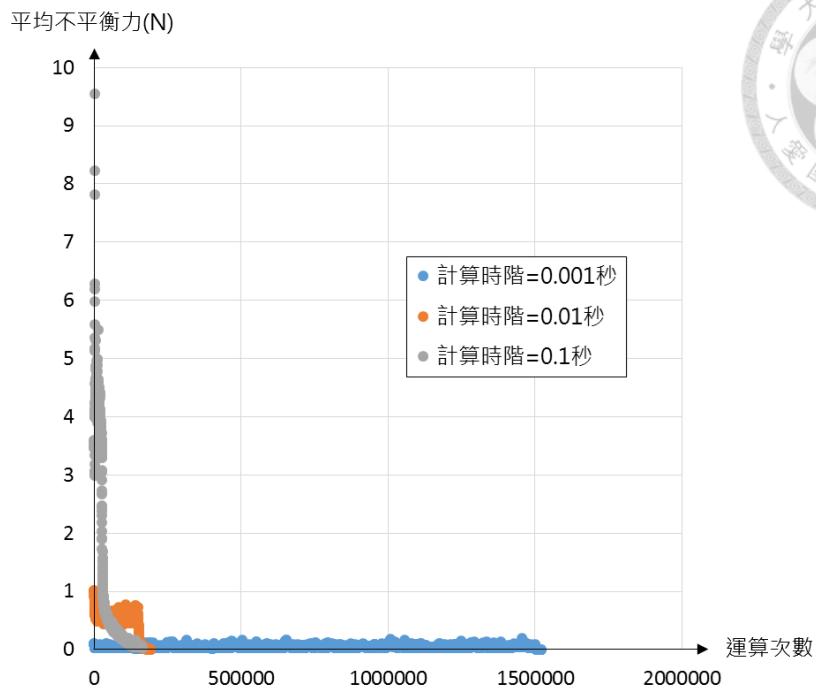


圖 4-1 PFC 時階設定與模型運算時不平衡力之關係

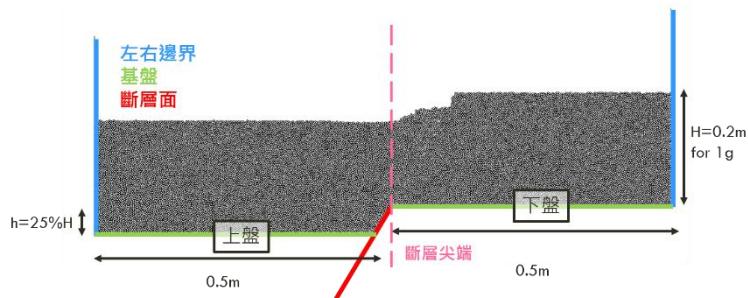


圖 4-2 數值模型之邊界設定

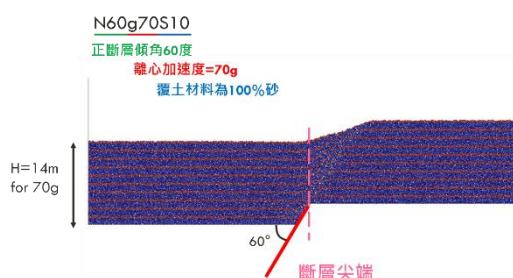


圖 4-3 數值模型之純砂土編號

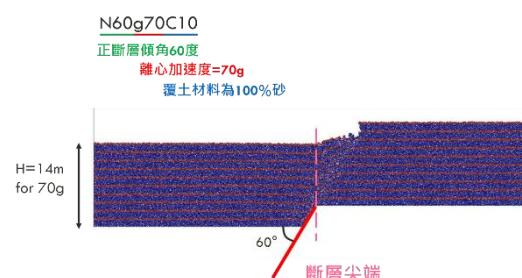


圖 4-4 數值模型之純黏土編號

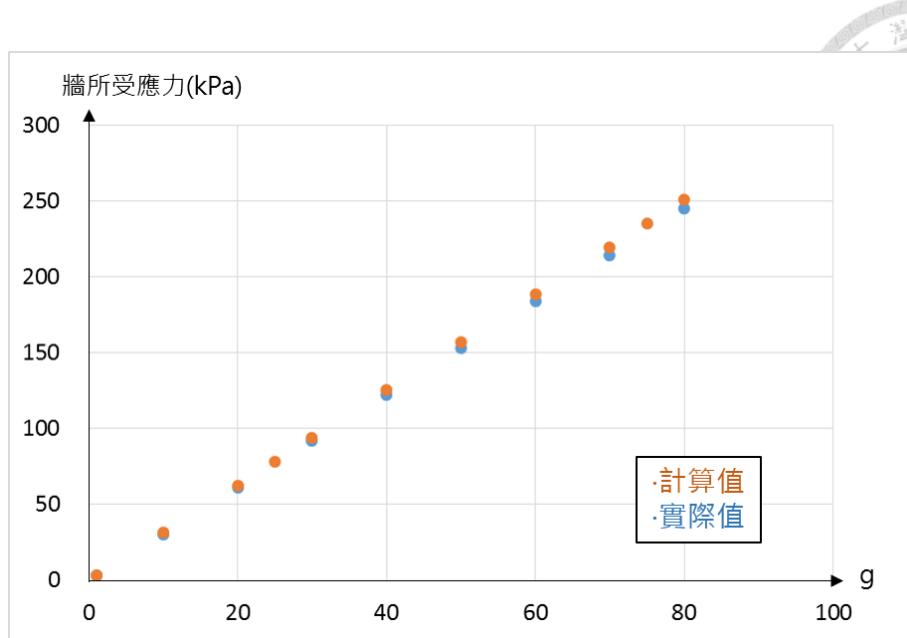


圖 4-5 基盤承受覆土應力理論值及實際值比對

#### 4.1.2 材料參數

PFC2D 模型中需給定顆粒之粒徑、單位重、接觸勁度、摩擦係數等微觀參數，本研究之共有 28759 個顆粒，其粒徑及數量比例為 1.49mm(90.2%)、1.05mm(5.5%)、0.74mm (4.3%)，約為物理離心試驗的石英砂砂放大 17 倍粒徑。顆粒接觸模式參考張有毅(2014)之建議，採線性接觸模式，直接給定正向勁度及切向勁度。張有毅量測其物理離心機砂箱頂部砂層之彈性係數，換算為 PFC2D 之勁度，給定正向勁度( $K_n$ )為  $0.3 \times 10^7$ (N/m)，並由經驗令  $K_n/K_s=3$ ，故切向勁度( $K_s$ )=  $0.1 \times 10^7$ (N/m)。顆粒摩擦係數由其砂土摩擦角 36 度之反正切函數換算，得其值為 0.73。另外，因 PFC2D 是給定顆粒單位重，因程式設定，同樣體積下，PFC2D 模擬之顆粒間隙會大於實際土體，即孔隙比較大，故增加顆粒單位重，並量測模型內底牆之受力，若底牆之受力近似於物理越南砂單位重乘以覆土深度，便得知人為給定之顆粒單位重為合理值。詳細流程已於 4.1.1 節討論。

陳榮華(2013)及張庭傑(2014)皆使用皂土混和甘油製作人工黏土以做為物理離心機斷層之覆土層，並於斷層錯動後，以十字片扭剪儀量測不同深度之不排水剪



力強度，其值多落在  $50\text{kPa}$ ( $\text{g}/\text{c}=40\%$ )及  $100\text{kPa}$ ( $\text{g}/\text{c}=34\%$ )左右。但十字片扭剪儀因量測區域小，誤差範圍較大，故國立中央大學李崇正老師團隊再次以人工黏土進行單壓測試，得其應力應變曲線如**圖 4-6**(張有毅提供)，UC-test1 是拌合後放置一天以上之試體，UC-test2、UC-test3、UC-test4 為拌合後數小時內直接進行單壓之試體，可見拌合後放置一天以上，黏土穩定後，單壓強度會較高，後續單壓數值模擬採 UC-test1 之應力應變曲線。

本研究欲在顆粒中間給定鍵結，以模擬具有凝聚性之黏土。2.3.1 節中已討論前人對於黏土材料於數值模型中之模擬，故採用接觸鍵結模式模擬黏土材料，而非顆粒間能夠抗彎矩的平衡鍵結模式。接觸鍵結模式是在顆粒間給定強度(單位為力)，當 PFC2D 程式計算其顆粒間受力大於該強度，便會呈現拉張或是剪力破壞。但 PFC2D 內鍵之接觸鍵結模式為脆性破壞，經與物理離心機斷層之產狀比對，發現只要數值模擬之初始巨觀彈性模數與物理單壓試驗(UC-test1)接近，且兩者之尖峰強度落在一個量級以內，其產狀結果不會相差太遠。並且考慮一般土壤之張力強度皆小於其剪力強度，結果顯示，採用正向強度為  $60\text{N}$ ，切向強度為  $90\text{N}$  時，其單壓強度(見**圖 4-7**)符合上述所言，與物理離心機之產狀比對也接近，產狀比對將於第 5 章討論。以此類推，本研究將上述之顆粒鍵結強度約乘以兩倍，再與高強度黏土之物理離心試驗比對，得接觸鍵結強度  $150\text{N}$ ，切向鍵結強度  $200\text{N}$  時，約可模擬( $\text{g}/\text{c}=40\%$ )之人工黏土。

**表 4-1** 及**圖 4-10** 為數值模型內的材料參數及顆粒粒徑曲線，令黏土質材料與砂性材料之粒徑及數量比例皆相同，只改變顆粒間的鍵結力，當顆粒間之接觸鍵結為零時，便是砂土材料。

砂土為顆粒全部無鍵結，黏土為層內顆粒有鍵結，層與層之間的顆粒無鍵結，對應鋪設多層黏土時，層間形成為相對弱面(見**圖 4-9** 至**圖 4-11**)。

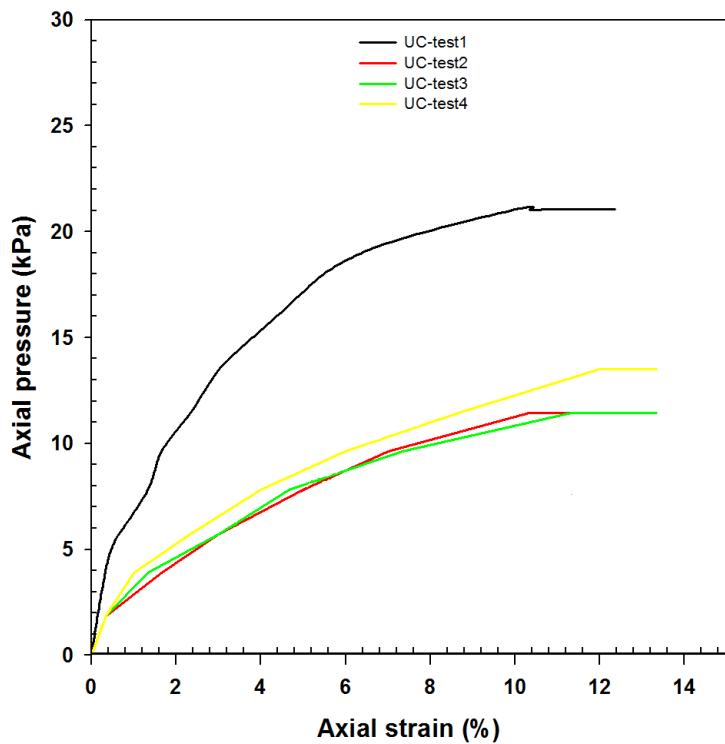


圖 4-6 人工黏土進行單壓試驗之應力應變曲線(國立中央大學李崇正老師團隊提供)

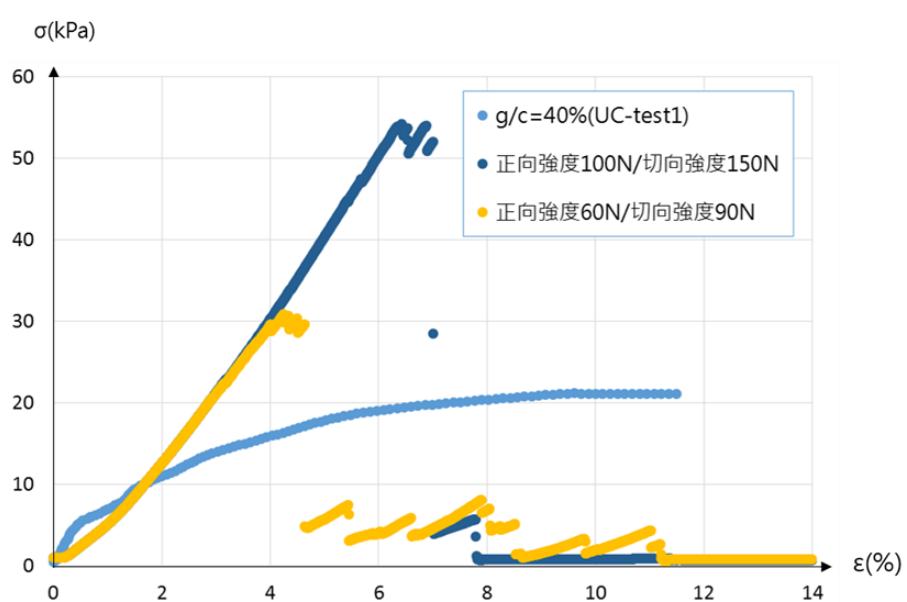


圖 4-7 數值單壓模擬之應力應變曲線



圖 4-8 正向強度 60N 切向強度 90N      圖 4-9 正向強度 100N 切向強度 150N

之數值單壓結果

之數值單壓結果

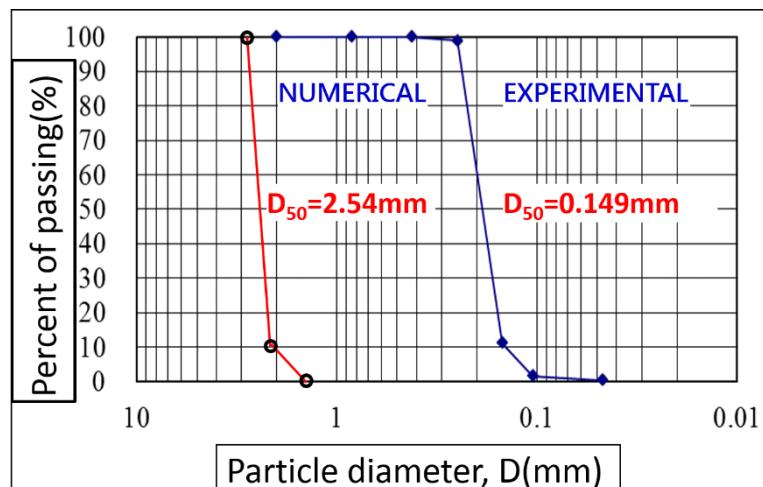


圖 4-10 數值模擬與物理離心機之粒徑曲線

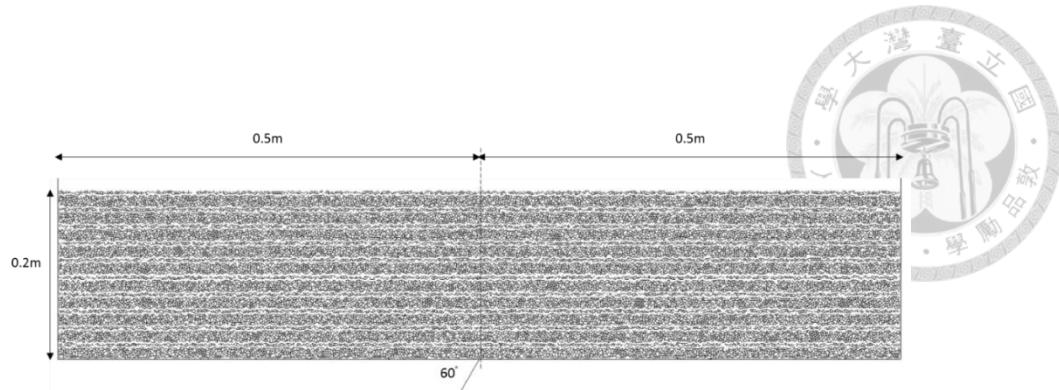


圖 4-11 覆土材料為純黏土斷層模型未錯動時之鍵結狀態

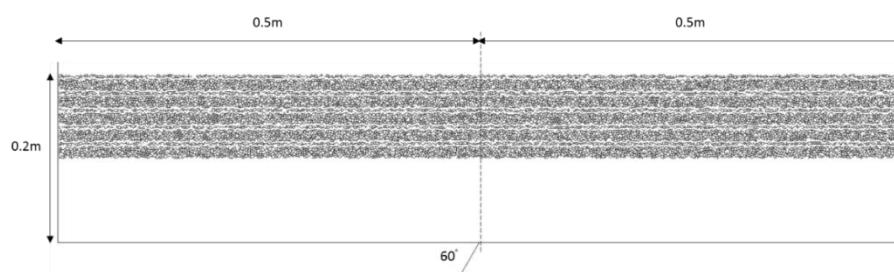


圖 4-12 覆土材料為黏土於砂土上斷層模型未錯動時之鍵結狀態

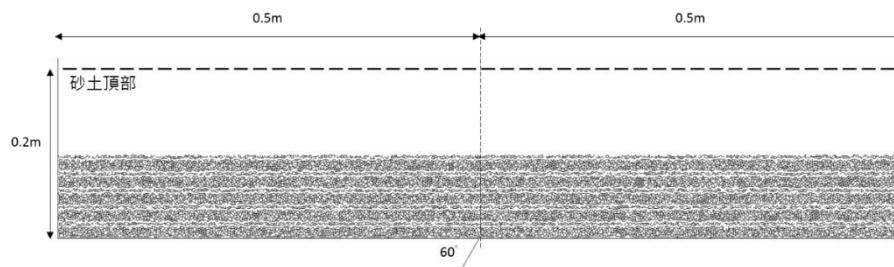


圖 4-13 覆土材料為砂土於黏土上斷層模型未錯動時之鍵結狀態

表 4-1 數值模擬材料參數表



顆粒單位重	1850(kg/m <sup>3</sup> )
顆粒粒徑	1.49mm(90.2%)
顆粒間摩擦係數	1.05mm(5.5%)
顆粒正向勁度，K <sub>n</sub>	0.74mm (4.3%)
顆粒切向勁度，K <sub>s</sub>	$K_n = K_{no} \left(\frac{\sigma'_v}{\sigma'_{vo}}\right)^{0.4}$ $K_{no}=0.3 \times 10^7 \text{ N/m}$
顆粒間接觸鍵結	1/3×Kn
顆粒間切向鍵結	0/60/150(N)
牆正向勁度	0/90/200(N)
牆切向勁度	$6 \times 10^{12}(\text{N/m})$
顆粒與牆之摩擦係數	$6 \times 10^{12}(\text{N/m})$
孔隙比，e	0/0.484



### 4.1.3 資料處理及驗證

由於正斷層的數值模擬容易出現地壘的構造，不易用張有毅提出之 Gompertz 函數耦合其地表剖面，故本研究直接輸出斷層於不同錯動率下之地表顆粒座標，計算地表任兩個顆粒之間的斜率，若超過  $1/150$  即將其列為受影響之區域，選擇  $1/150$  之原因是參考張有毅(2014)Gompertz 函數的斜率門檻值及 Bjerrum 於 1963 年提出建物受轉動後，產生之角變量及其對應之破壞徵兆，詳見附錄 D。

待標示出所有受影響之區域後， $X_h$  為地表變形帶寬於上盤(hanging wall)之邊界座標， $X_f$  為地表變形帶寬於上盤(foot wall)之邊界座標，故定義斷層尖端投影處為 X 原點，向下盤方向為正，故  $X_h$  為負值， $X_f$  為正值。若欲將  $X_h$  及  $X_f$  對斷層之覆土厚正規化，即  $X_h$  及  $X_f$  除以覆土厚 H，便得到  $X_{h,n}$  及  $X_{f,n}$ ，n 表示正規化座標(normalized)。然而，個別元素法之顆粒為個別獨立運算，容易出現少部分的位移過大之歧異點，此歧異點在上述的篩選邏輯中，特別容易被標示出，因此為消除歧異點，除了顆粒間斜率超過  $1/150$  之外，本研究再加上下列兩項條件：顆粒本身之旋轉角度超過  $\tan^{-1}(1/150)$ 、顆粒本身之位移超過模擬所使用之最大粒徑 ( $2.98 \times 10^{-3} m$ )，顆粒的相對位移及轉角須為上述三項條件的交集，才會被標示為影響範圍(如**圖 4-12** 及**圖 4-13**)。

待所有數值砂箱模型錯動完成後，可採上述條件搜尋出地表及土中的影響帶寬，如**圖 4-14**，由搜尋到的顆粒，可得到地表變形帶的左右邊界，以斷層尖端投影線左右區分為上下盤邊界，邊界以外便是為不受斷層錯動影響的區域。此外，也會觀察數值砂箱的土體剪動帶發展情形，並與離心機物理砂箱比對(詳細將於第 5 章討論)，而具黏土材料覆土層之正斷層，與具砂性材料覆土層之正斷層之最大差異，便是可觀察斷鍵破裂分布及地表形貌，前者會具有高角度之斷層崖，如**圖 4-16**，並於斷層尖端處發展土體剪動帶及地表之張力裂縫，以上皆可由斷鍵展示，如**圖 4-15**。

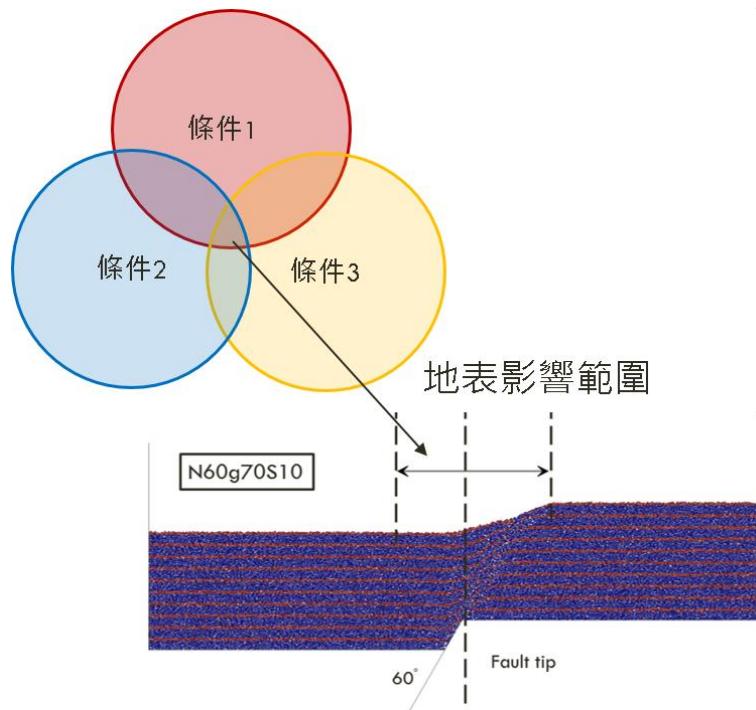


圖 4-14 影響範圍篩選邏輯示意圖

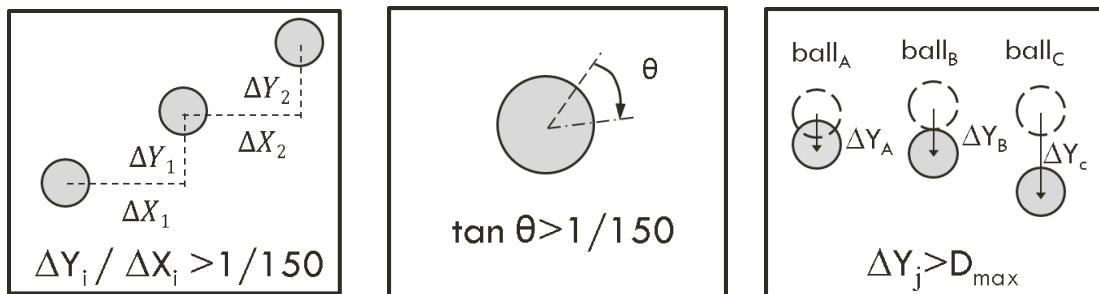


圖 4-15 影響範圍之三項篩選條件

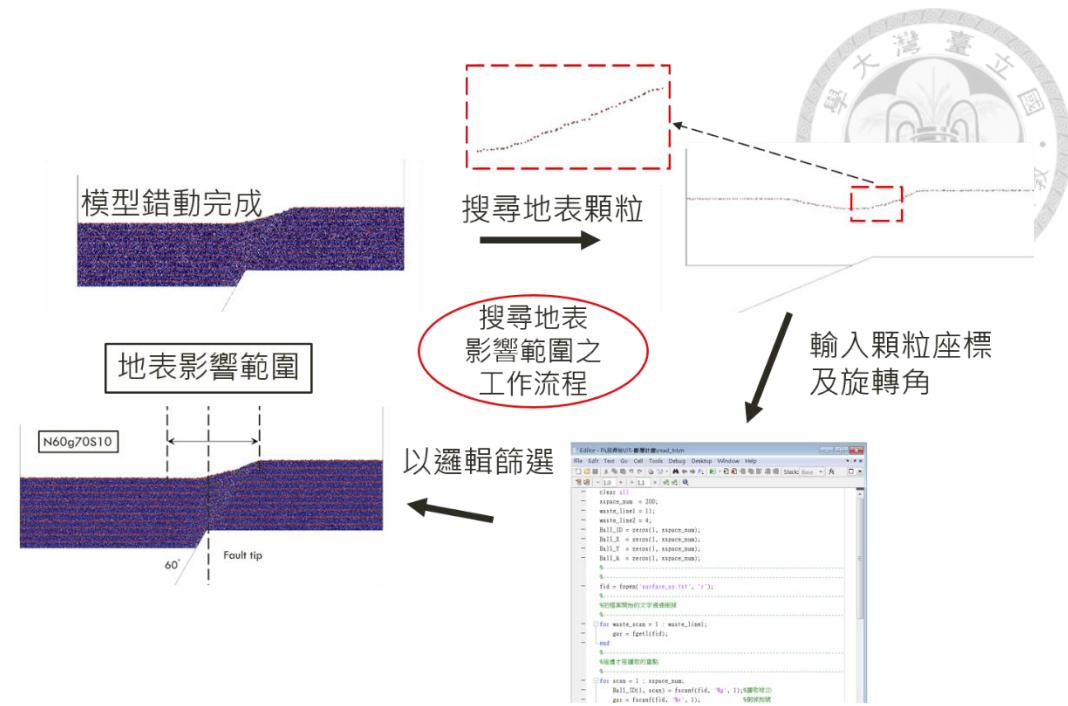


圖 4-16 地表影響範圍工作流程

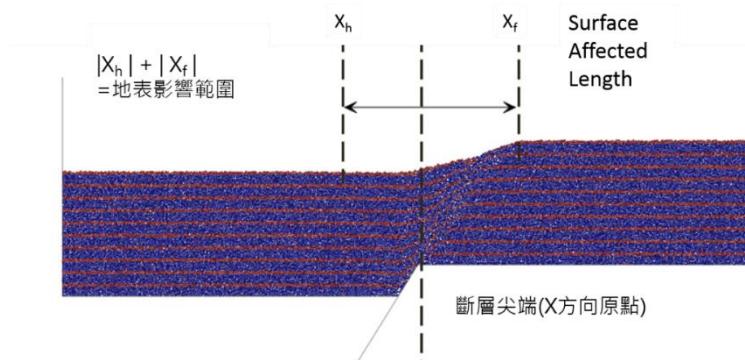


圖 4-17 正斷層上下盤之地表影響範圍示意圖

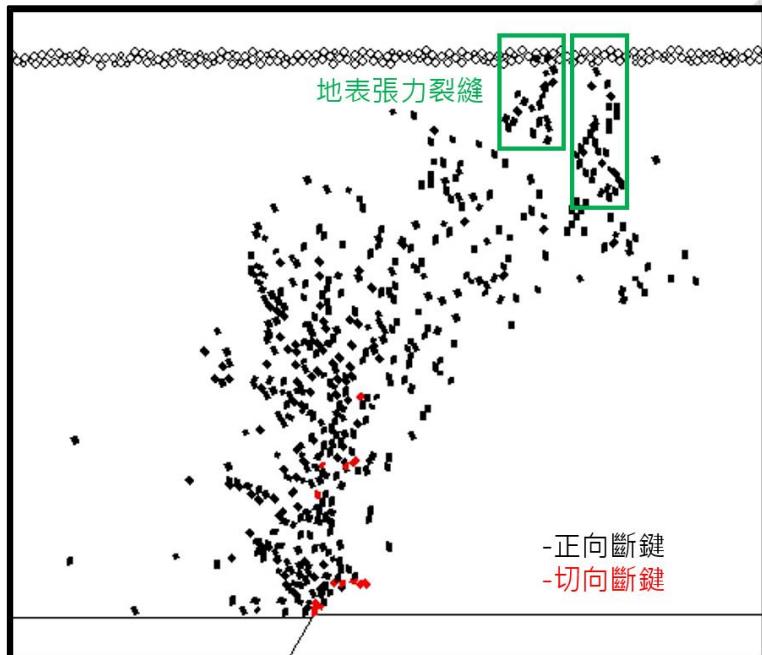


圖 4-18 黏土覆土層受正斷層錯動形成之地表張力裂縫

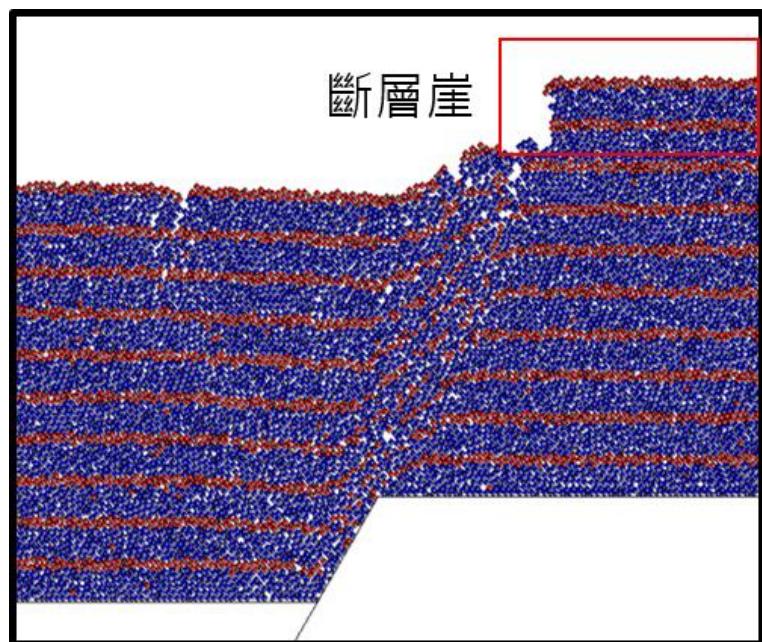


圖 4-19 黏土覆土層受正斷層錯動形成之地表斷層崖



## 第5章 離心機正斷層之數值模擬成果

本研究先參考張有毅(2013)之結果，以數值模擬砂箱重現物理離心機斷層產生狀，確認數值模擬砂箱之正確性。而後以斷層傾角( $22.5^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $37.5^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $52.5^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $67.5^\circ$ 、 $75^\circ$ 、 $82.5^\circ$ 、 $90^\circ$ )、覆土層厚度(5米、10米、15米)、砂土摩擦角( $33^\circ$ 、 $35^\circ$ 、 $37^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $41^\circ$ 、 $42^\circ$ 、 $47^\circ$ 、 $48^\circ$ 、 $52^\circ$ 、 $54^\circ$ 、 $61^\circ$ )做為操控變因，列於**表 5-1**，共進行330組純砂正斷層數值模擬。

表 5-1 前人純砂離心正斷層試驗編號及試驗條件

作者及年份	試驗編號	覆土材料
	1gNtest18	砂土 0.2m
張有毅(2013)	40gNtest26	砂土 0.2m
	80gNtest24	砂土/0.2m

### 5.1 純砂質覆土材料

#### 5.1.1 與前人之物理離心機試驗比對

張有毅完成之純砂正斷層離心機試驗，共有三組不同參數之斷層砂箱，以本研究之命名，分別是 N60g1S10、N60g40S10 及 N60g80S10，即斷層傾角為 60 度之純砂正斷層，於 1g、40g、80g 重力場之試驗。本研究擷取以上三組離心機砂箱試驗之地下染色砂層變位剖面及斷層跡的發展及演化列於**圖 5-1**、**圖 5-3**及**圖 5-5**，於斷層尖端往上盤方向 1 倍覆土厚及斷層尖端往下盤方向 1.5 至 2 倍覆土厚擷取影像。而本研究之數值模擬砂箱則列於**圖 5-2**、**圖 5-4**及**圖 5-6**。數值模擬砂箱之砂土巨觀摩擦角皆為 33 度，即控制模型內顆粒不可旋轉比例為 0%。



圖 5-1 及圖 5-2 為 N60g1S10 的離心機與數值砂箱模擬比對，重力場對應之現地覆土厚度為 0.2 米，虛線是斷層尖端位置投影線，土體內剪動帶由黃色線標記，可見物理離心機砂箱皆主要有三條剪動帶，始於斷層面(傾角 60 度)與上盤之交會點，剪動帶左一向上盤傾斜，且超過擷取影像邊界，數值離心機砂箱有四條剪動帶，始於斷層面(傾角 60 度)與上盤之交會點，剪動帶左一向上盤傾斜，且超過擷取影像邊界，兩個模型皆在斷層尖端處有集中剪動帶。

圖 5-3 及圖 5-4 為 N60g40S10 的離心機與數值砂箱模擬比對，離心重力場對應之現地覆土厚度為 8 米，虛線是斷層尖端位置投影線，土體內剪動帶由黃色線標記，可見數值與物理離心機砂箱皆主要有四條剪動帶，始於斷層面(傾角 60 度)與上盤之交會點，剪動帶左一向上盤傾斜，且越往地表其角度越緩；中間兩條剪動帶主要集中在斷層尖端向上投影處，兩條剪動帶中央之地表斷層跡為坡度開始變化區域。剪動帶右一向上盤傾斜，約莫與斷層面平行。

圖 5-5 及圖 5-6 為 N60g80S10 的離心機與數值砂箱模擬比對，離心重力場對應之現地覆土厚度為 16 米，虛線是斷層尖端位置投影線，土體內剪動帶由黃色線標記，可見物理離心機砂箱主要有四條剪動帶，數值砂箱有四條剪動帶及一條分支剪動帶，分支是於主要剪動帶右一靠近現地尺度覆土 8 米之深度開始產生，並向下盤邊界方向傾斜。數值與物理砂箱之四條主要剪動帶皆始於斷層面(傾角 60 度)與上盤之交會點，剪動帶左一向上盤傾斜，且越往地表其角度越緩；中間兩條剪動帶主要集中在斷層尖端向上投影處，但較 N60g40S10 模型更靠近下盤，剪動帶左二至地表之斷層跡為坡度開始變化區域。剪動帶右一向上盤傾斜，約莫與斷層面平行，其分支約莫並向下盤邊界方向傾斜。

圖 5-7 至圖 5-9 列出 N60g1S10、N60g40S10、N60g80S10 於錯動率為 5%、10%、15%、20%、25% 之變位剖面及其正規化地表變形帶寬。表 5-2 至表 5-4 則是列出地表變形帶寬之實際距離及其正規化之值。 $X_h$  為地表變形帶寬於上盤(hanging wall)之邊界座標， $X_f$  為地表變形帶寬於上盤(foot wall)之邊界座標，因定



義斷層尖端投影處為 X 原點，向下盤方向為正，故  $X_h$  為負值， $X_f$  為正值。若欲將  $X_h$  及  $X_f$  對斷層之覆土厚度正規化，即  $X_h$  及  $X_f$  除以覆土厚 H，便得到  $X_{h,n}$  及  $X_{f,n}$ ，n 表示正規化座標(normalized)。

由**圖 5-7 及圖 5-10**可見 N60g1S10 於錯動率等於 5%、10%、15%、20%、25%之地表變形帶，錯動率等於 5%時，上下盤之變形帶寬皆不明顯，起伏極小，肉眼不易辨識，錯動率等於 10%時，上盤的變形帶寬為斷層尖端向上盤方向 1.078 倍覆土厚，下盤的變形帶寬為斷層尖端向下盤方向 0.213 倍覆土厚，隨著錯動率增加至 15%、20%、25%，下盤的變形帶寬約與錯動率成比例變化，而上盤的變形帶寬則是在錯動率等於 15%快速發展，待錯動率增加至 20%及 25%，變形帶寬的變化量並不如 5%至 15%增加得多。

**圖 5-8 及圖 5-11**是 N60g40S10 於錯動率等於 5%、10%、15%、20%、25%之地表變形帶，錯動率等於 5%時，上下盤之變形帶寬皆不明顯，起伏極小，肉眼不易辨識，錯動率等於 10%時，上盤的變形帶寬為斷層尖端向上盤方向 0.037 倍覆土厚，下盤的變形帶寬為斷層尖端向下盤方向 0.519 倍覆土厚，隨著錯動率增加至 15%、20%、25%，下盤的變形帶寬約與錯動率成比例變化，而上盤的變形帶寬則是在錯動率等於 15%快速發展，待錯動率增加至 20%及 25%，變形帶寬的變化量並不如 5%至 15%增加得多。

**圖 5-10、圖 5-12、圖 5-14**為不同離心重力場下之數值模擬砂箱地表剖面，橫軸為正規化的 X 座標，即將斷層尖端投影處視為 X 的原點，再對 X 軸座標對覆土厚度正規化，縱軸為地表的垂直位移量對覆土厚度正規化。不同離心重力場反應不同覆土厚之純砂正斷層，可以觀察到在同樣的錯動率下，覆土厚度越淺，地表變形越明顯，且會在斷層尖端投影處產生凹向下的地壘（上下盤分開看）。**圖 5-11、圖 5-13、圖 5-15**為不同離心重力場下之數值模擬砂箱地表變形帶寬，淺覆土時，地表變形帶寬主要在上盤發展，且錯動率達到某個臨界點（加入明確值）後會快速變形。

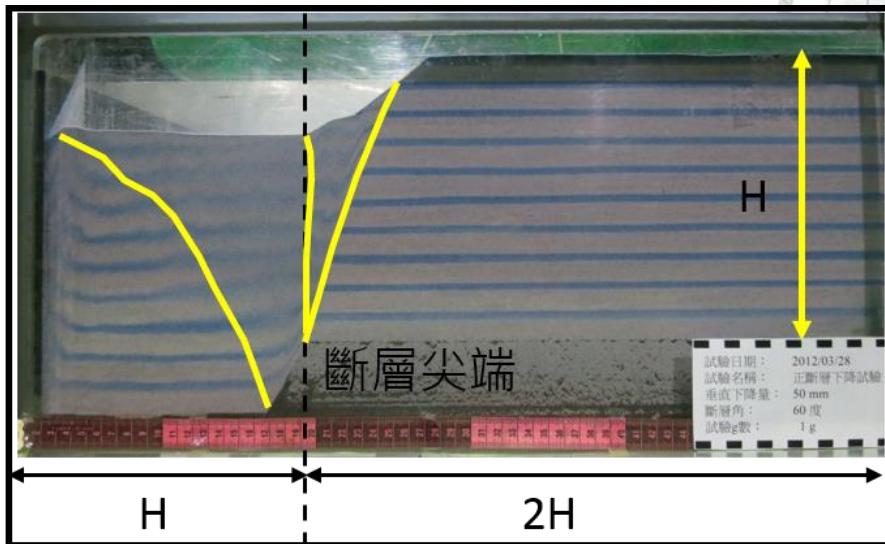


圖 5-1 物理試驗 1g 純砂正斷層側剖面及土中剪動帶(張有毅, 2013)

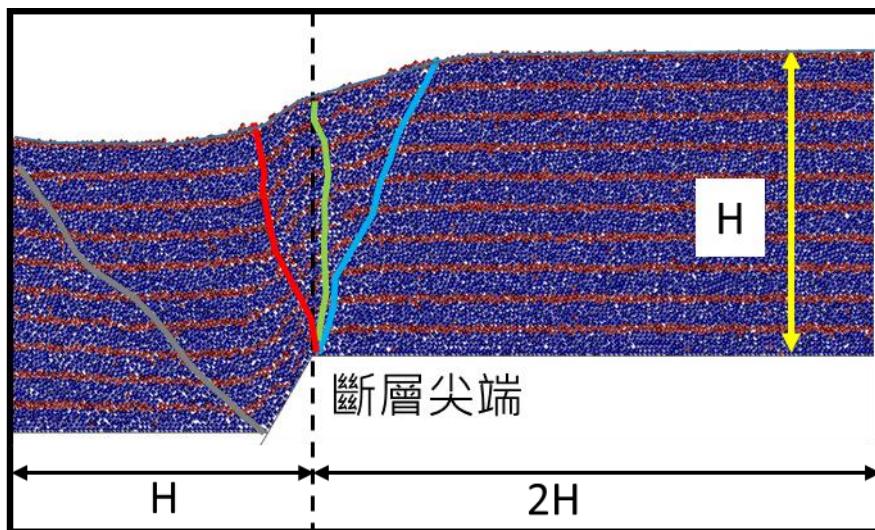


圖 5-2 數值模擬 1g 純砂正斷層側剖面側剖面及土中剪動帶

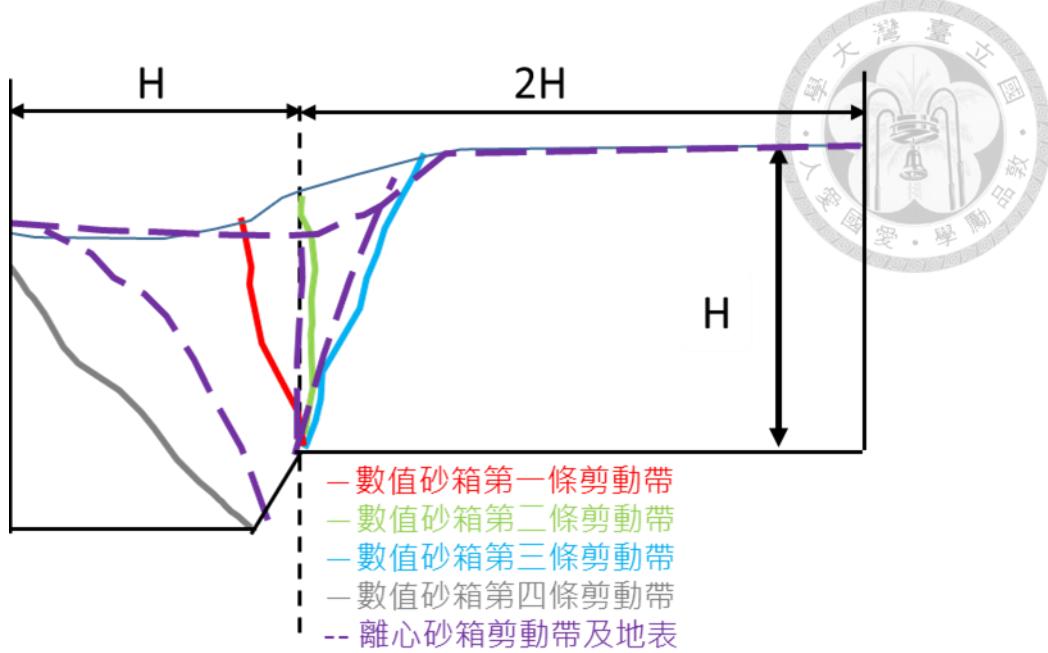


圖 5-3 數值模擬 1g 純砂正斷層與物理試驗比較之剪動帶

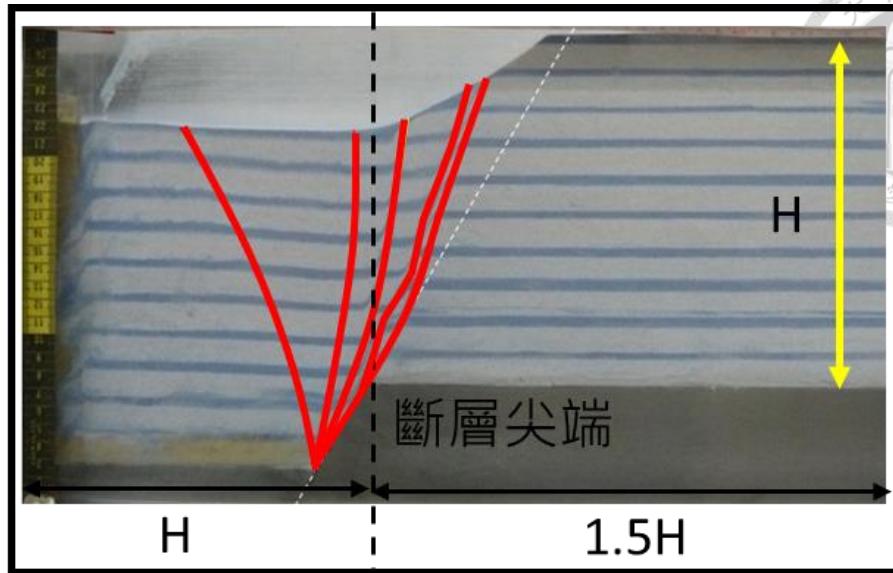


圖 5-4 物理離心機試驗 40g 純砂正斷層側剖面及土中剪動帶(張有毅，  
2013)

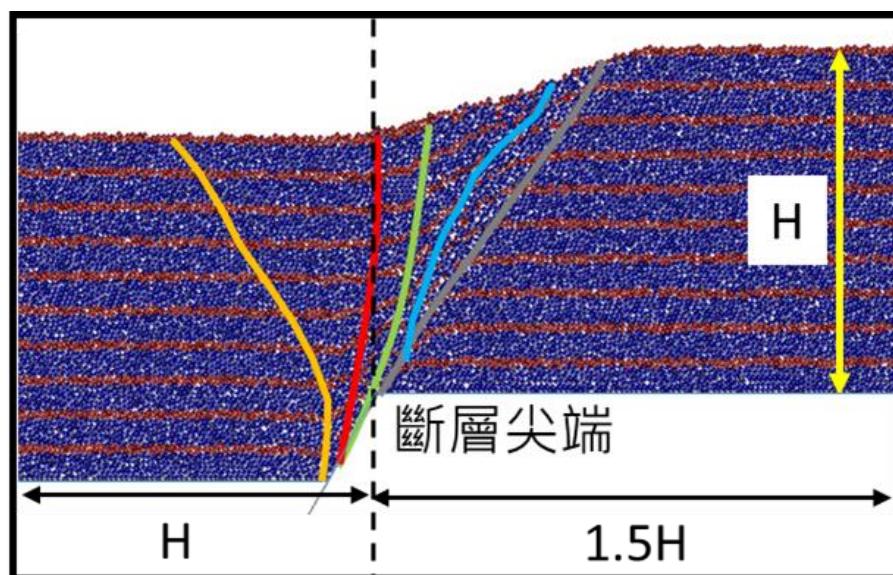


圖 5-5 數值離心機模擬 40g 純砂正斷層側剖面側剖面及土中剪動帶

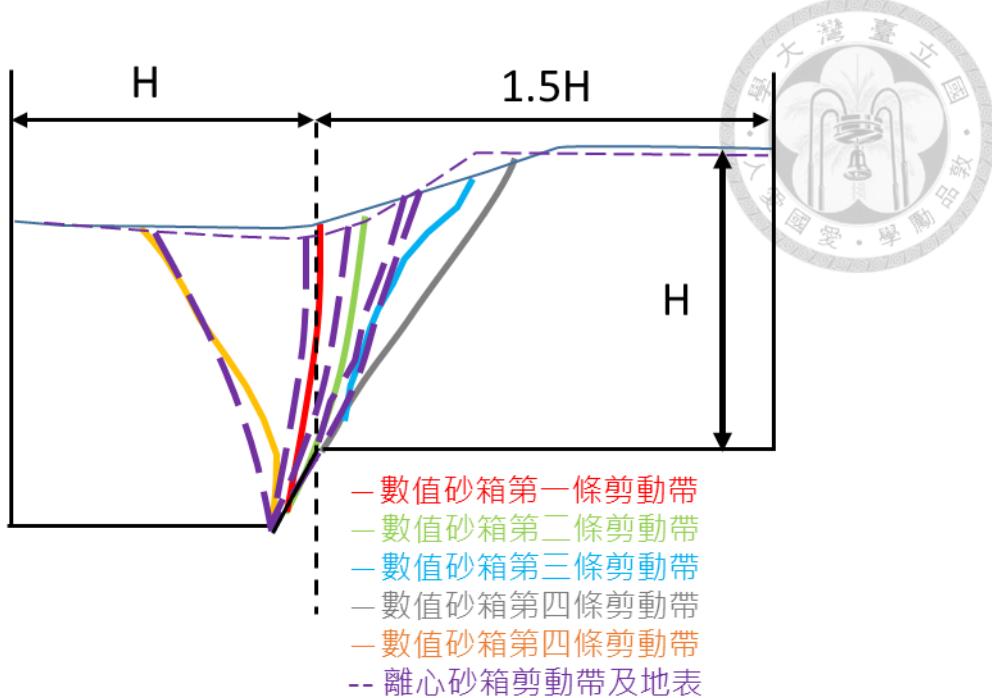


圖 5-6 數值模擬 40g 純砂正斷層與物理試驗比較之剪動帶

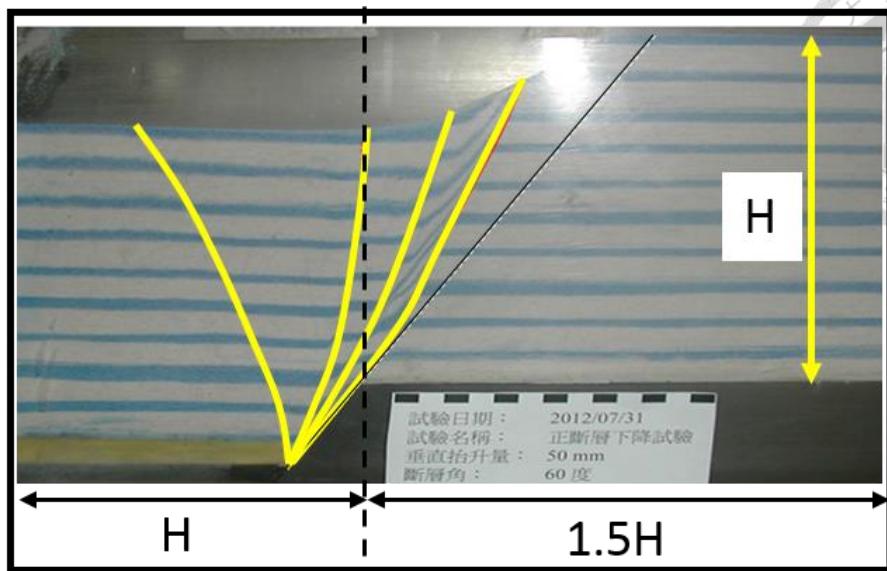
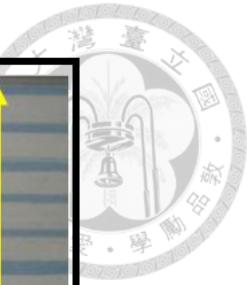


圖 5-7 物理離心機試驗 80g 純砂正斷層側剖面及土中剪動帶(張有毅，  
2013)

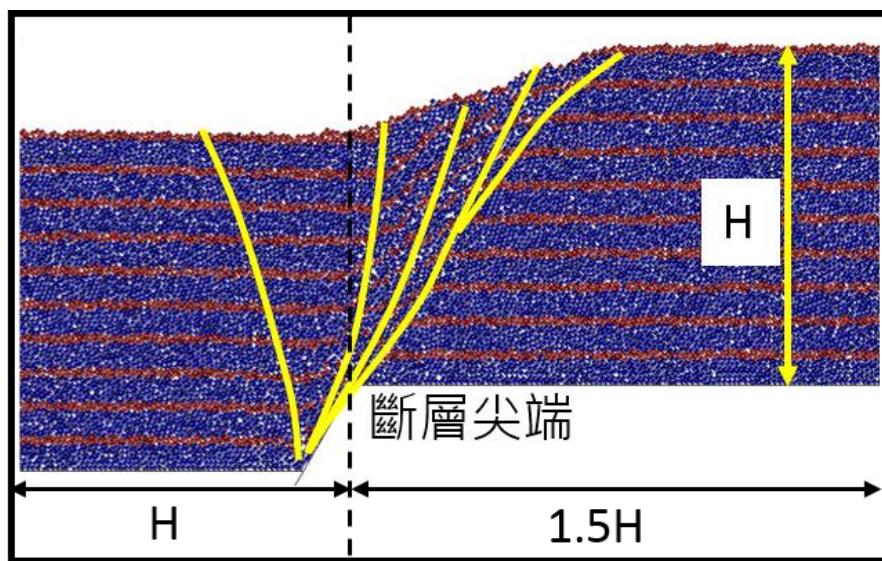


圖 5-8 數值離心機模擬 80g 純砂正斷層側剖面側剖面及土中剪動帶

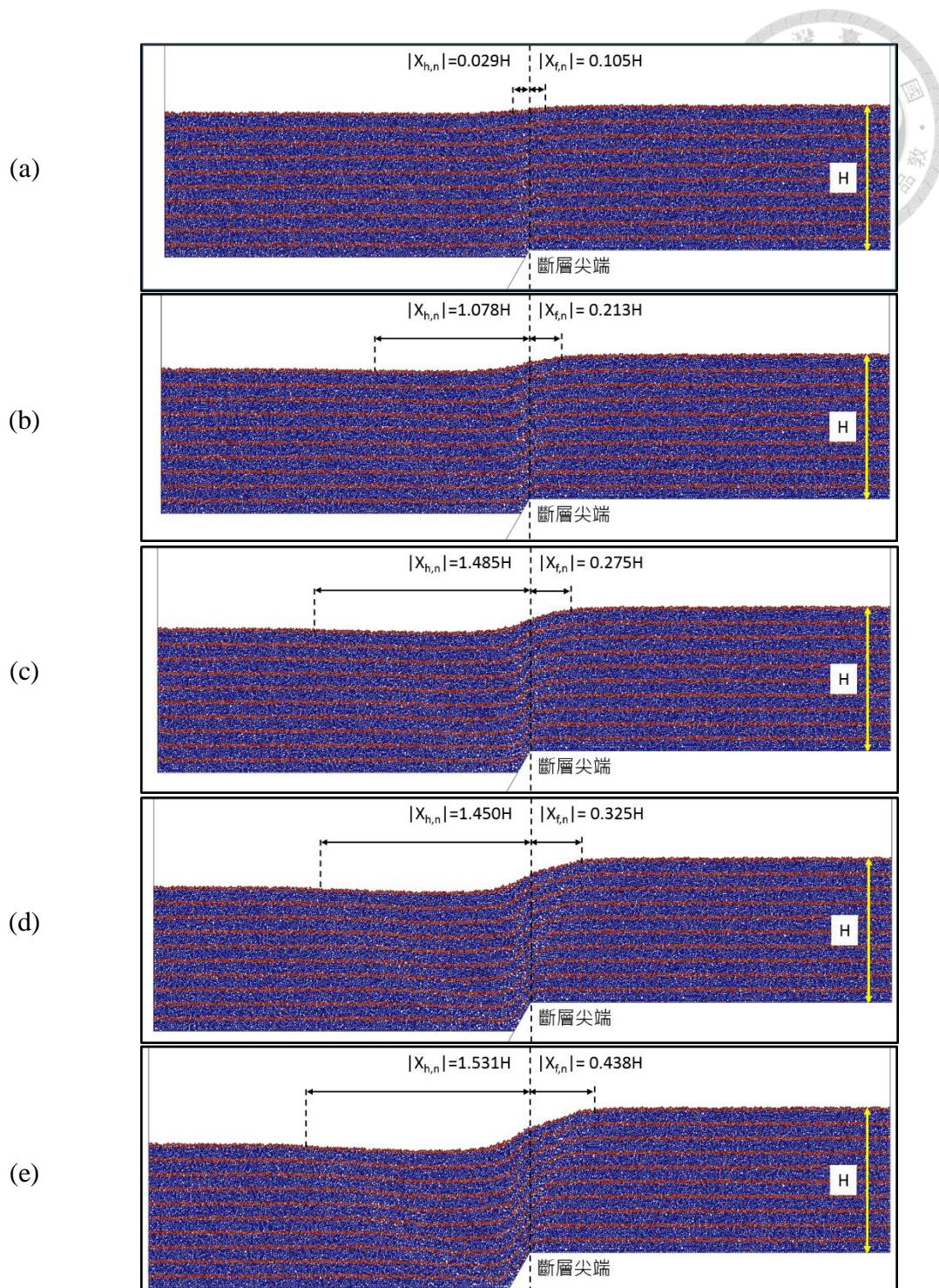


圖 5-9 不同錯動率下 N60g1S10 之地表影響範圍示意圖(a)r=5% ;

(b)r=10% ; (c)r=15% ; (d)r=20% ; (e)r=25%

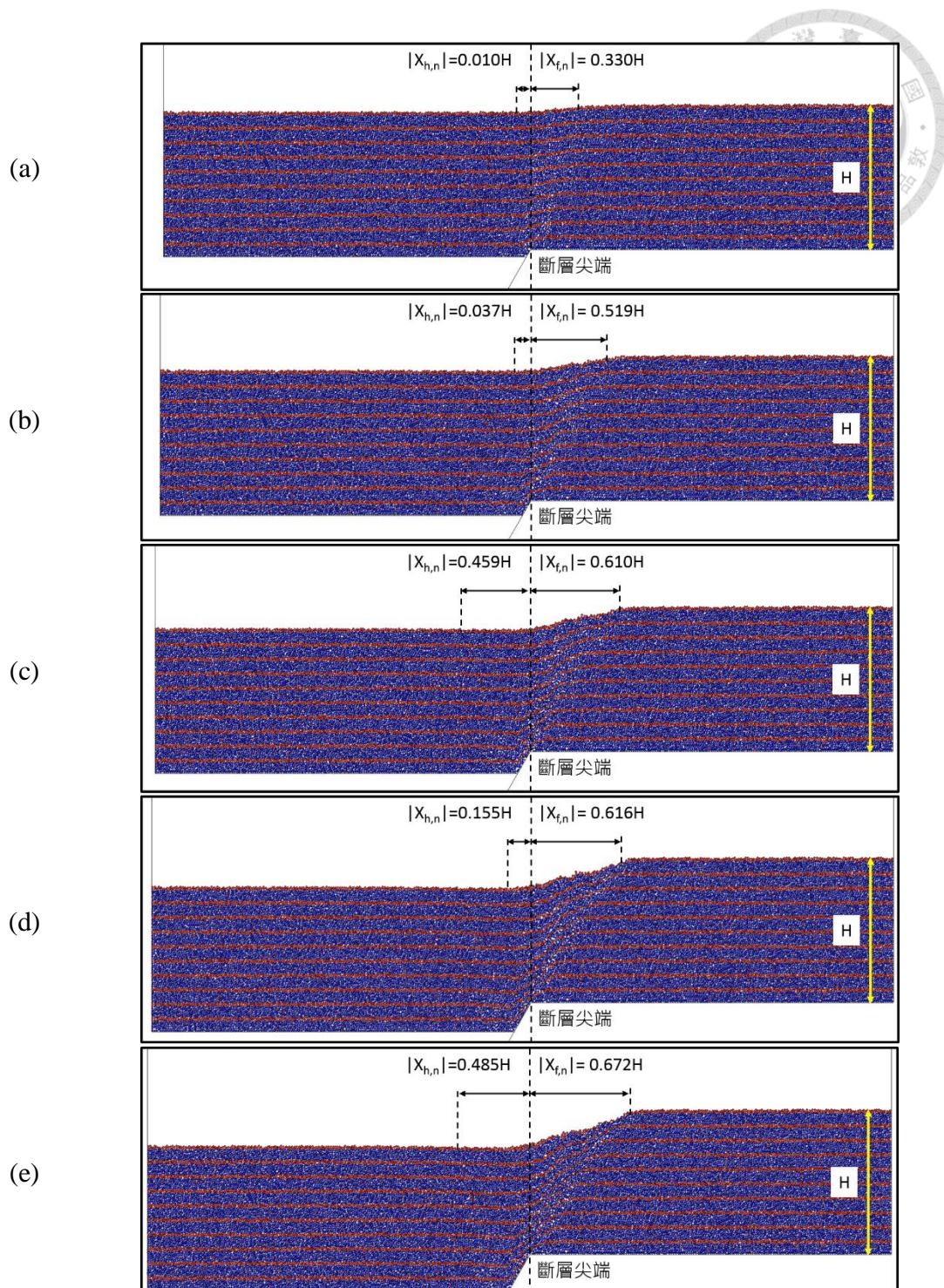


圖 5-10 不同錯動率下 N60g40S10 之地表影響範圍示意圖 (a)r=5% ;

(b)r=10% ; (c)r=15% ; (d)r=20% ; (e)r=25%

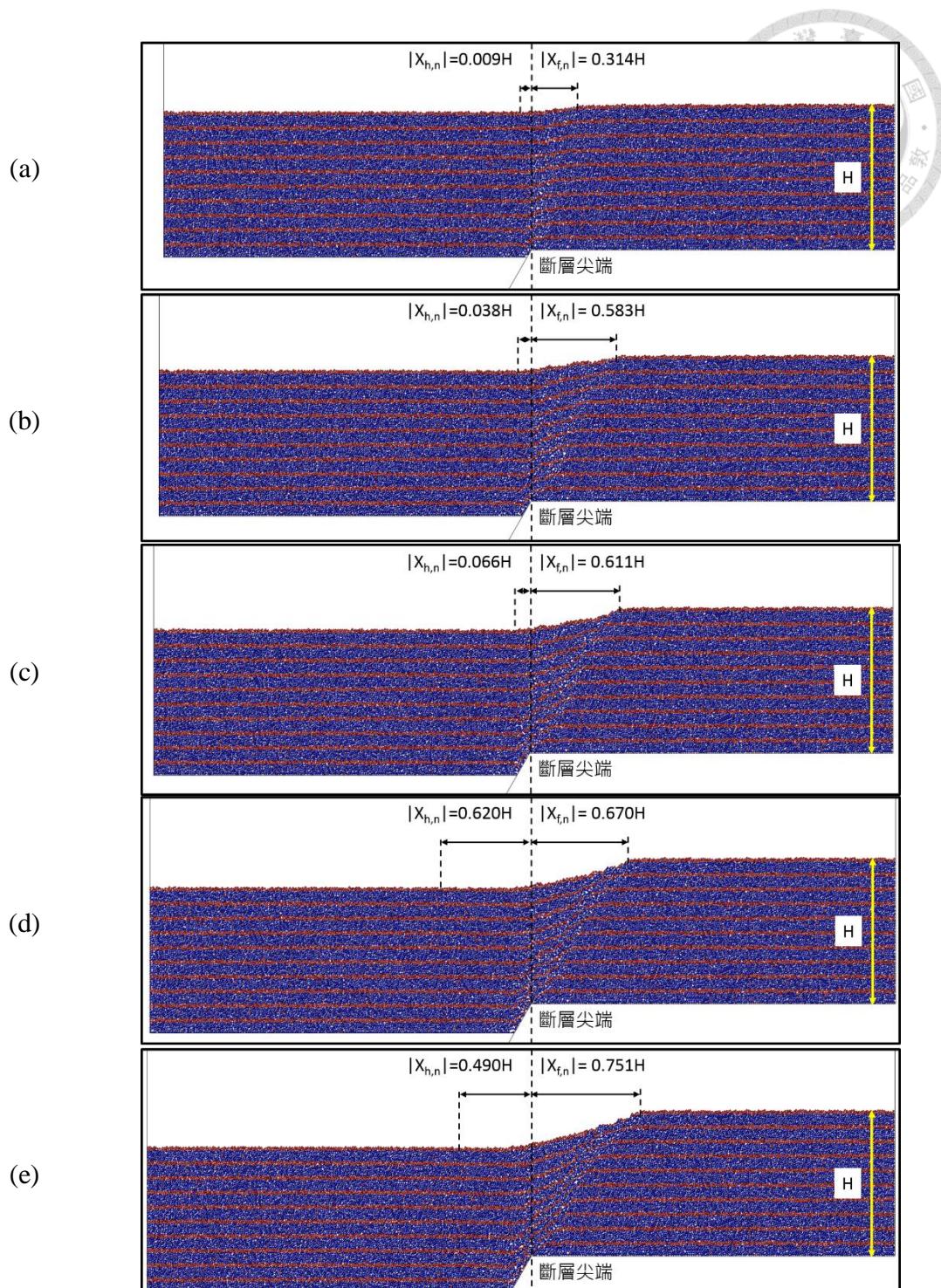


圖 5-11 不同錯動率下 N60g80S10 之地表影響範圍示意圖 (a)r=5% ;

(b)r=10% ; (c)r=15% ; (d)r=20% ; (e)r=25%

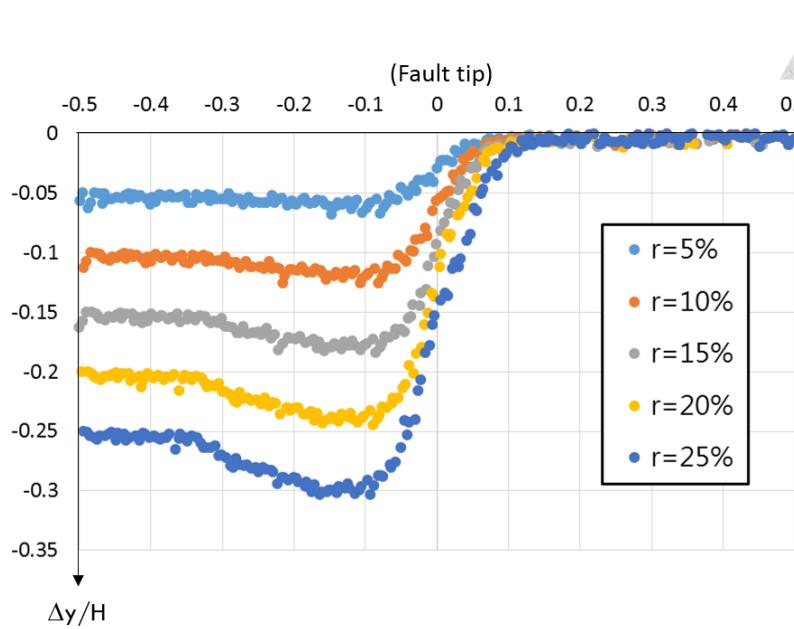


圖 5-12 不同錯動率下 N60g1S10 之地表變形剖面

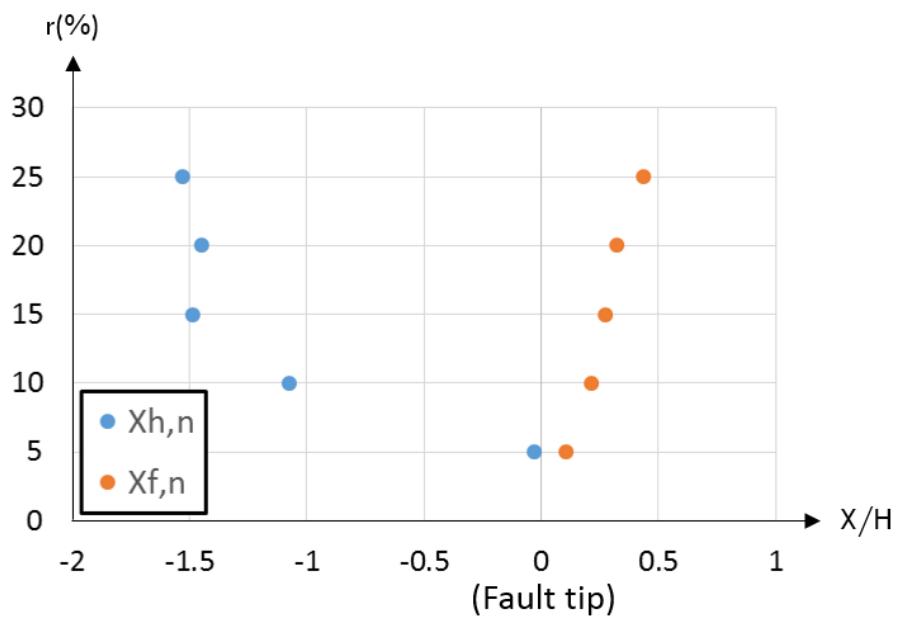


圖 5-13 不同錯動率下 N60g1S10 之地表影響範圍

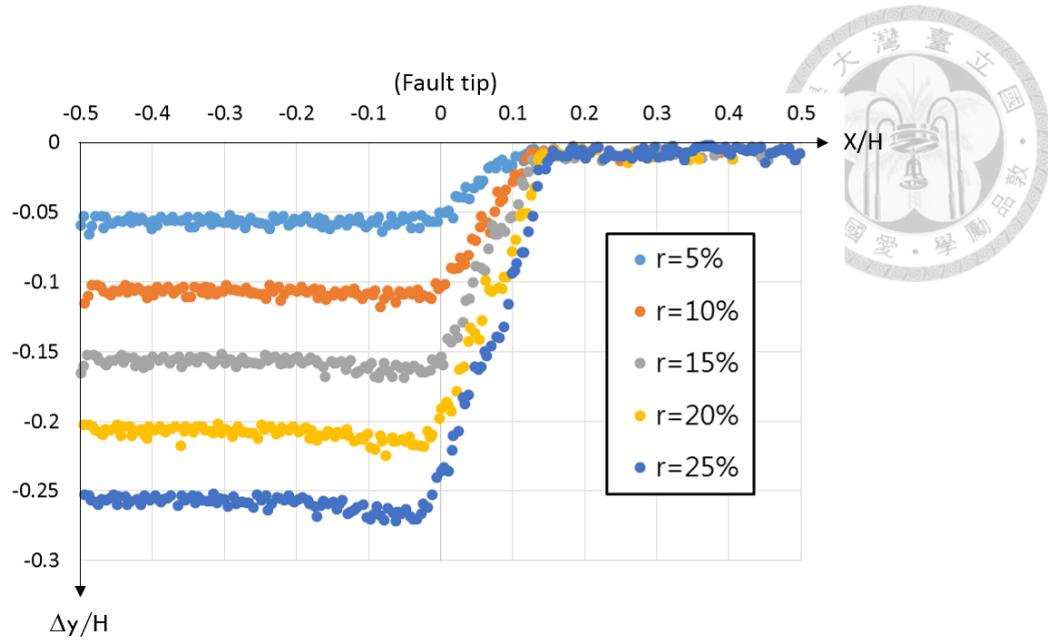


圖 5-14 不同錯動率下 N60g40S10 之地表變形剖面

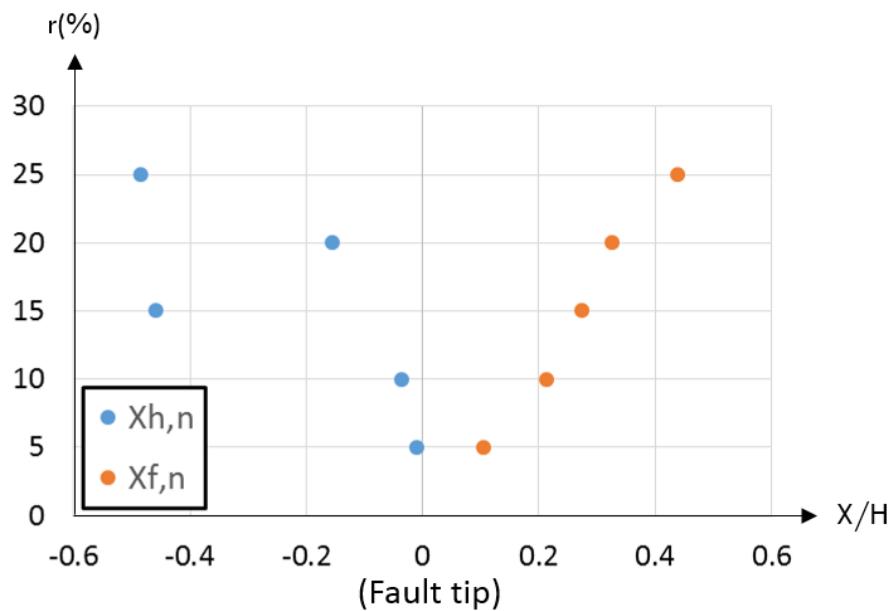


圖 5-15 不同錯動率下 N60g40S10 之地表影響範圍

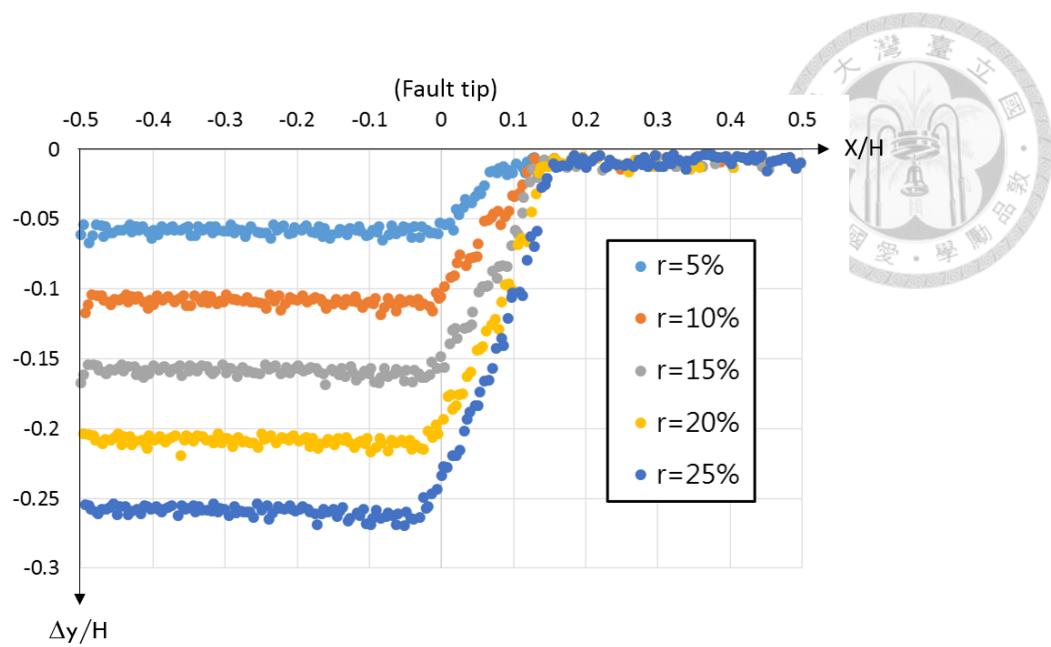


圖 5-16 不同錯動率下 N60g80S10 之地表變形剖面

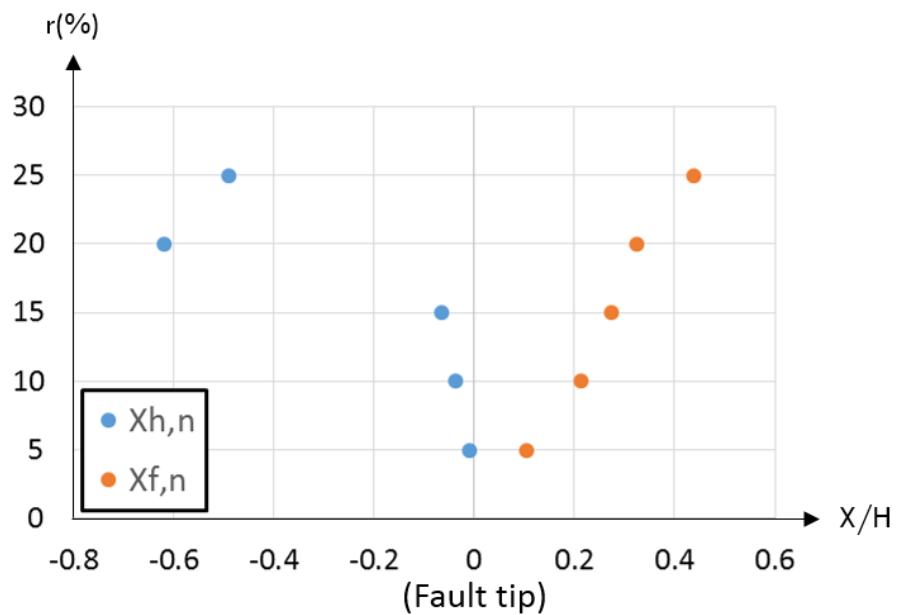


圖 5-17 不同錯動率下 N60g80S10 之地表影響範圍

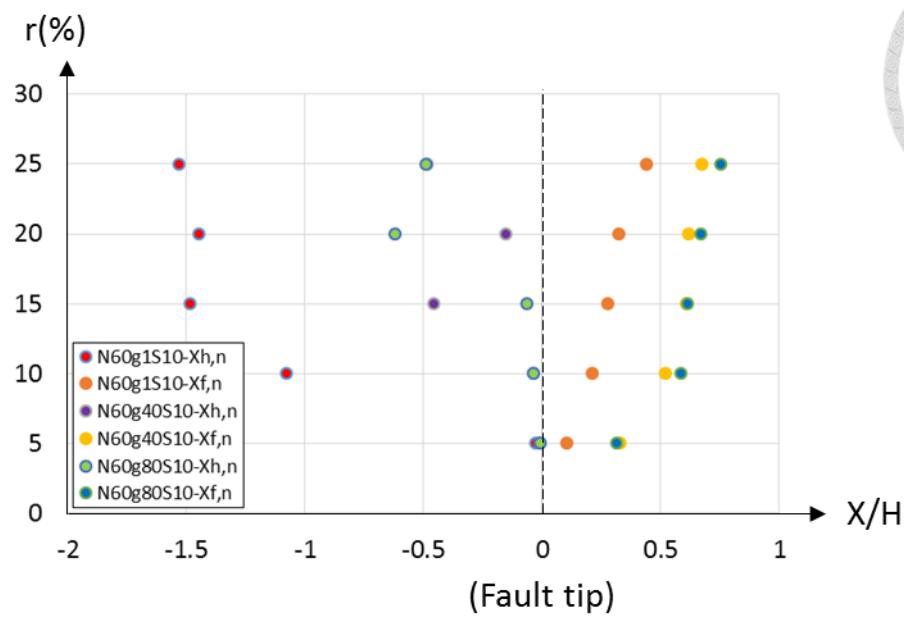


圖 5-18 不同錯動率及  $g$  數之純砂正斷層地表影響範圍

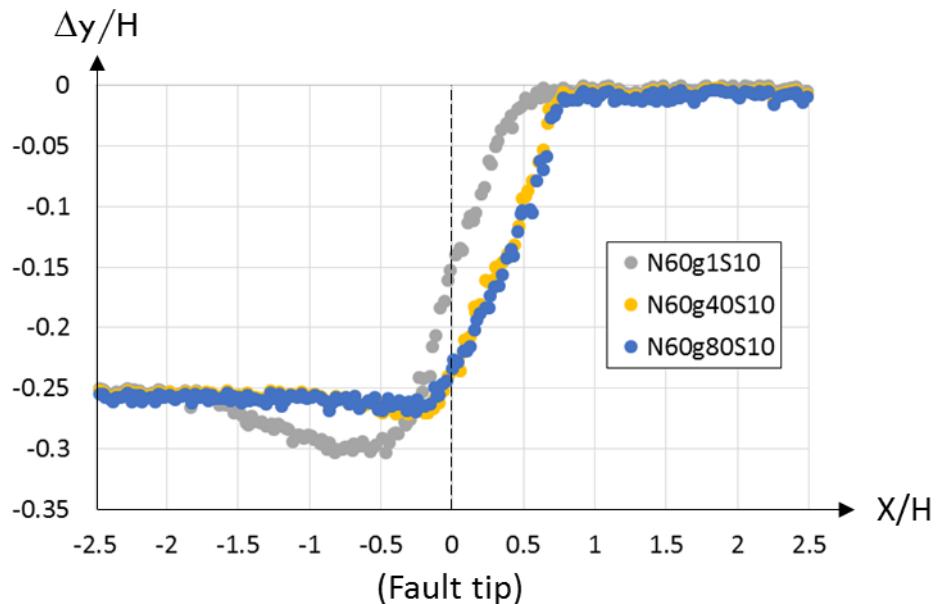


圖 5-19 錯動率 25% 下不同  $g$  數之純砂正斷層地表影響範圍



表 5-2 不同錯動率下 1g 純砂正斷層之地表影響範圍

錯動率(%)	X <sub>h</sub> (m)	X <sub>f</sub> (m)	X <sub>h,n</sub>	X <sub>f,n</sub>
5	0.494	0.521	-0.029	0.105
10	0.285	0.543	-1.078	0.213
15	0.203	0.555	-1.485	0.275
20	0.210	0.565	-1.450	0.325
25	0.194	0.588	-1.531	0.438

表 5-3 不同錯動率下 40g 純砂正斷層之地表影響範圍

錯動率(%)	X <sub>h</sub> (m)	X <sub>f</sub> (m)	X <sub>h,n</sub>	X <sub>f,n</sub>
5	0.498	0.566	-0.010	0.330
10	0.493	0.604	-0.037	0.519
15	0.408	0.622	-0.459	0.610
20	0.469	0.623	-0.155	0.616
25	0.403	0.634	-0.485	0.672

表 5-4 不同錯動率下 80g 純砂正斷層之地表影響範圍

錯動率(%)	X <sub>h</sub> (m)	X <sub>f</sub> (m)	X <sub>h,n</sub>	X <sub>f,n</sub>
5	0.498	0.563	-0.009	0.314
10	0.493	0.617	-0.038	0.583
15	0.487	0.622	-0.066	0.611
20	0.376	0.634	-0.620	0.670
25	0.402	0.650	-0.490	0.751



## 5.1.2 改變砂土摩擦角

前述提及本研究以控制無鍵結顆粒於斷層錯動中之不可旋轉比例，模擬砂土材料之巨觀摩擦角，**圖 5-16** 為 N60g75S10，即傾角 60 度、覆土厚 15 米之純砂正斷層，控制顆粒不可旋轉比例為 0%、20%、40%、60% 之數值砂箱模型，對應之摩擦角分別為 33 度、36 度、40 度、47 度。

在一次錯動且錯動率為 25% 時，砂土巨觀摩擦角越小，整體的土中變形帶越往下盤集中，如**圖 5-16** 的(a)為摩擦角 33 度的 15 米厚純砂土斷層模型，主要剪動帶邊界都在下盤處於地表出露，斷層尖端處的剪動帶角度相當接近斷層傾角，且剪動帶非常窄，幾乎貼近斷層面，地表出露的斷層跡為一緩坡；隨著摩擦角增加至 36 度，如**圖 5-16** 的(b)，土中剪動帶開始向上盤發展，帶寬也開始增加；摩擦角為 40 度時，斷層尖端附近的剪動帶寬增大，尤其是上盤，並由一傾斜角度轉為垂直於地表，下盤的變形及剪動帶寬與較少摩擦角之模型差異不大；當控制顆粒不不可旋轉比例為 60%，即相當於砂土摩擦角 57 度，由於一半以上的顆粒間不可旋轉，受力後不會轉動，而是產生位移，基盤附近的剪動帶寬因而又開始轉為較窄，主要剪動面之角度都接近斷層傾角，地表也產生因為顆粒不會旋轉滑動而自立的斷層崖。

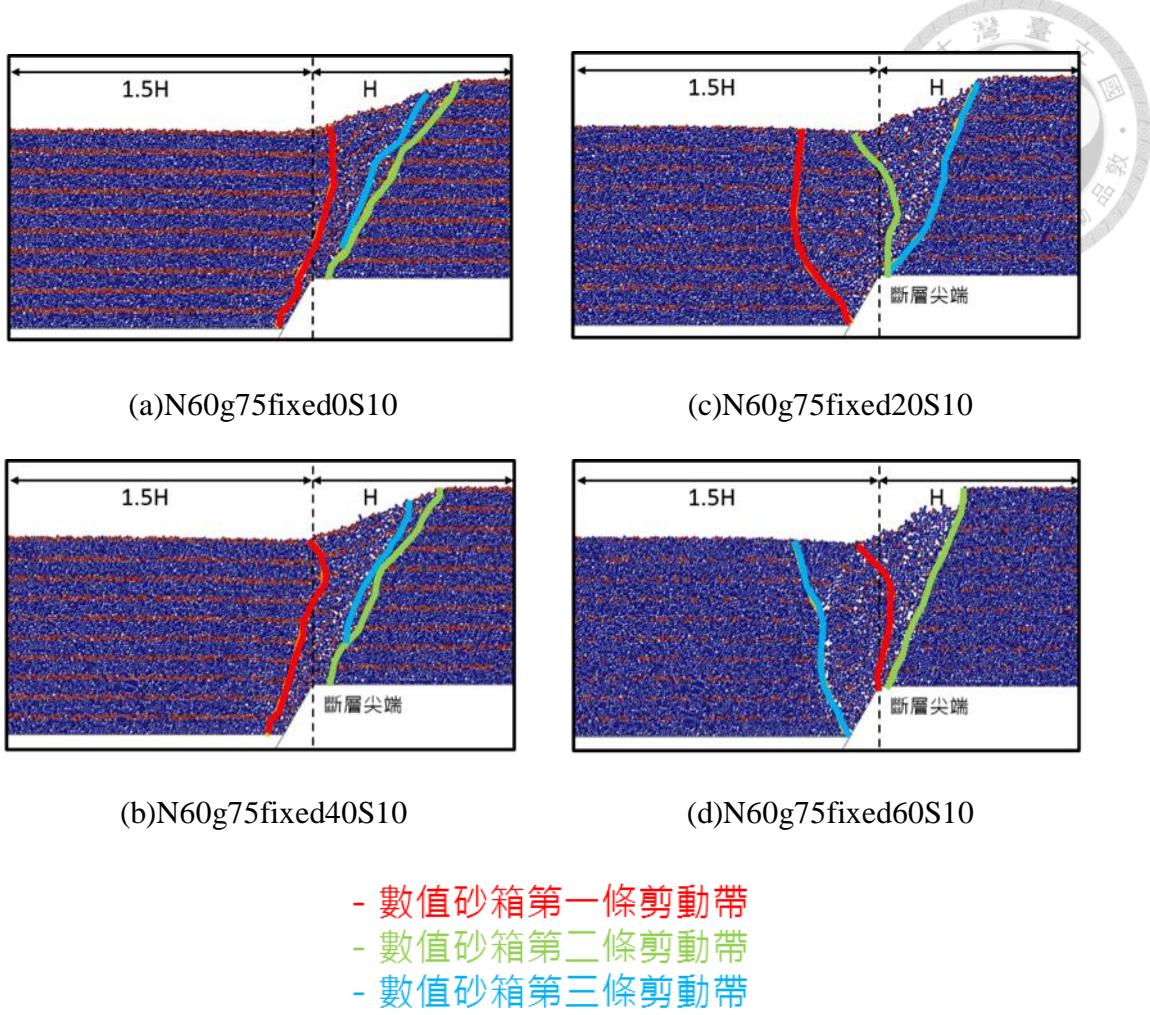
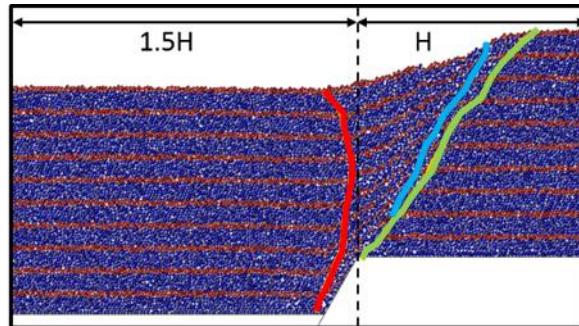


圖 5-20 純砂正斷層傾角 60 度覆土 15 米不同砂土摩擦角於錯動率達到 25% 時之地表變形剖面 (a) $\varphi=33^\circ$  ; (b)  $\varphi=36^\circ$  ; (c)  $\varphi=40^\circ$  ; (d)  $\varphi=47^\circ$

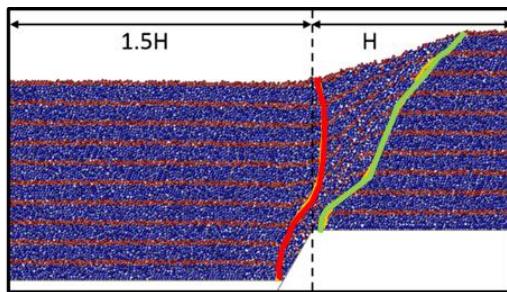


### 5.1.3 不同覆土厚度

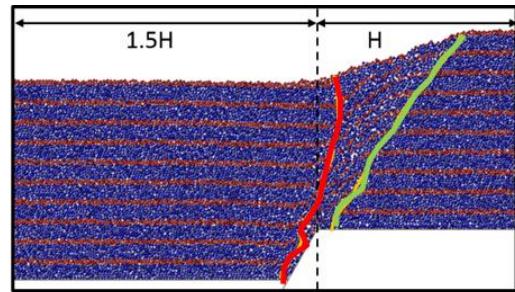
同樣的斷層條件(傾角及錯動率)下，不同的覆土厚度，可以預期當剪動帶發展至地表，將會有不同的起伏差異，主要是因為覆土較厚時，土體傳遞至地表之應變量，其值會小於覆土較淺的斷層，且覆土應力也會影響剪動帶發展。**圖 5-17**為顆粒不不可旋轉比例為 0% 之 N60g25S10、N60g50S10 、N60g75S10，即砂土巨觀摩擦角 33 度，傾角 60 度，改變覆土厚為 5 米、10 米及 15 米之純砂正斷層，覆土厚為 5 米時，剪動帶始於斷層面與上盤及下盤(斷層尖端)之交界點，上盤剪動帶約在斷層尖端投影處出現地表斷層跡，初始之角度向下盤傾斜，約平行斷層面，但近地表處其角度開始向上盤反傾，下盤之剪動帶角度相當接近斷層傾角；當覆土深度增加時，如至 10 米，上盤發展之剪動帶開始往斷層尖端及下盤移動，剪動帶始於斷層面與上盤及下盤(斷層尖端)之交界點，上盤剪動帶在斷層尖端投影處正上方出現地表斷層跡，初始之角度向下盤傾斜，約平行斷層面，但近地表處其角度接近垂直地表，下盤之剪動帶角度相當接近斷層傾角；整體而言，土中變形帶寬小於覆土厚為 5 米之模型；覆土厚為 15 米時，上盤發展之剪動帶非常貼近斷層面，剪動帶始於斷層面與上盤及下盤(斷層尖端)之交界點，上盤剪動帶在斷層尖端投影處偏下盤處出現地表斷層跡，初始之角度向下盤傾斜，約平行斷層面，但近地表處其角度接近垂直地表，下盤之剪動帶角度相當接近斷層傾角，整體而言，土中變形帶寬為三組模型內最窄的。



(a)N60g25fixed0S10



(b)N60g50fixed0S10



(c)N60g75fixed0S10

- 數值砂箱第一條剪動帶
- 數值砂箱第二條剪動帶
- 數值砂箱第三條剪動帶

圖 5-21 純砂正斷層傾角 60 度砂土摩擦角 33 度於錯動率達到 25% 時，不同覆土厚之地表變形剖面(a)覆土 5 米(b)覆土 10 米(c)覆土 15 米



### 5.1.4 改變斷層傾角

圖 5-18 及圖 5-19 為 25g 重力場環境下，摩擦角為 33 度的純砂覆土層正斷層，其對應的現地尺度覆土厚為 5 米( $=25 \times 0.2$ )，傾角為 22.5 度、30 度、37.5 度、45 度、52.5 度、60 度、67.5 度、75 度、82.5 度、90 度，共 10 組砂箱模型。藉由改變斷層面的傾角，以觀察斷層傾角對於剪動帶發展的情況。

斷層傾角為 22.5 度時，可見其剪動帶發展至地表的斷層跡已經超出擷取邊界，即地表變形帶的邊界，在斷層尖端向上盤處 1.5 倍覆土厚及斷層尖端向下盤處 1 倍覆土厚以外，斷層面於地表之投影處，有一凹向下的地表曲線，這變是地壘，於斷層傾角小於 60 度的正斷層皆可觀察到。在斷層傾角界於 22.5 度至 52.5 度之間(見圖 5-18(a)至(e)部份)，肉眼可見其土體變形帶寬隨著傾角增加而逐漸變窄。但要在斷層傾角等於 60 度，上盤之剪動帶才開始比較明顯地靠近斷層尖端投影線，之後若再增加斷層傾角，則會使下盤的剪動帶也開始向斷層尖端投影線集中，但上盤剪動帶卻又開始擴展，使上盤的變形帶寬增加，下盤的變形帶寬減少。而在土體內的變形帶，則是當斷層傾角等於 60 度、67.5 度、75 度、82.5 度為較窄，符合一般土壤力學定義的正斷層。

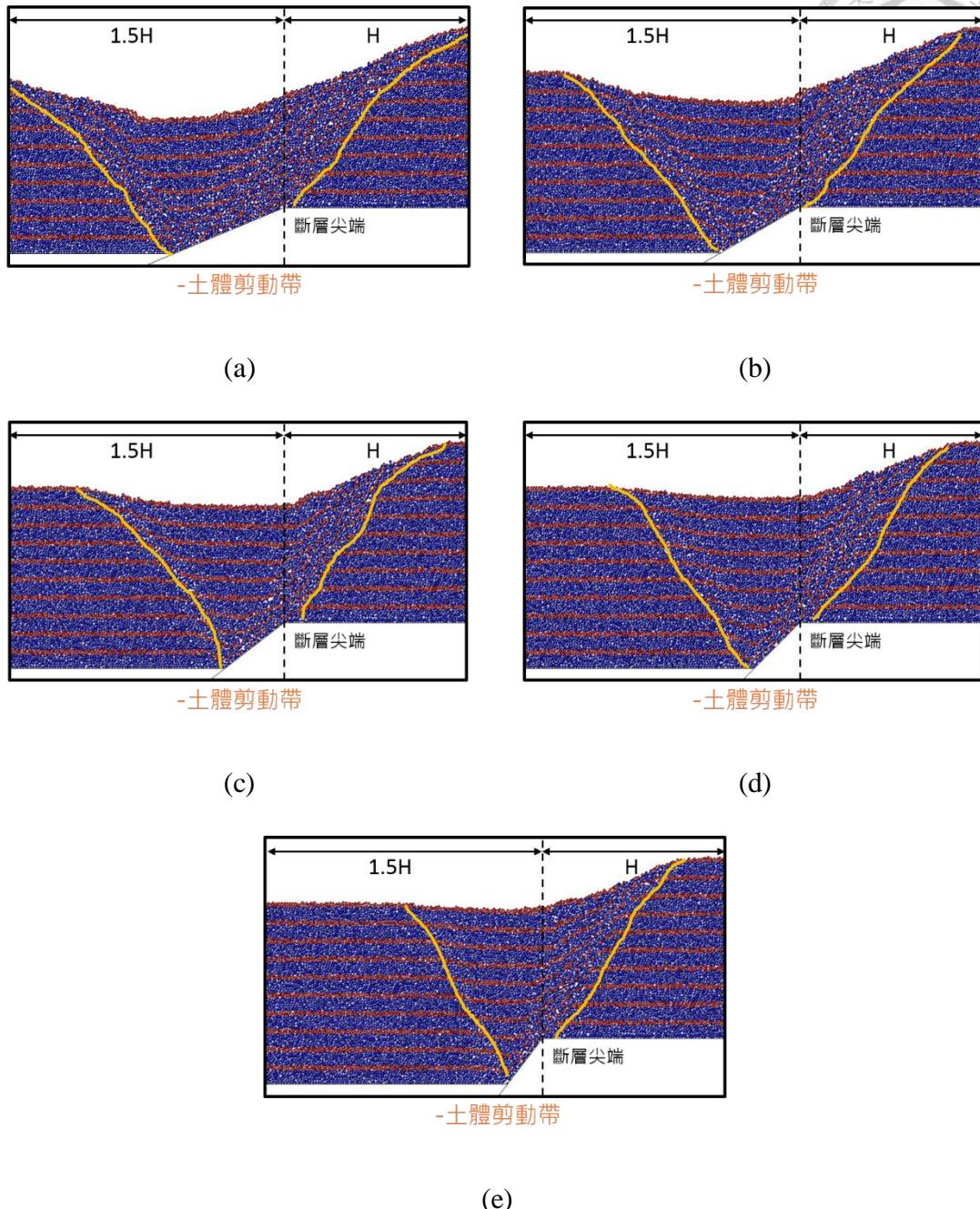
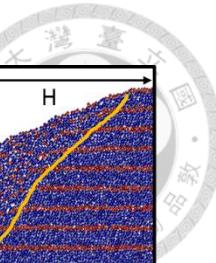


圖 5-22 純砂正斷層於 25g 重力場下不同斷層傾角於錯動率達到 25% 時之純砂正斷層變形剖面-1 (a)  $22.5^\circ$  ; (b) $30^\circ$  ; (c) $37.5^\circ$  ; (d) $45^\circ$  ; (e) $52.5^\circ$

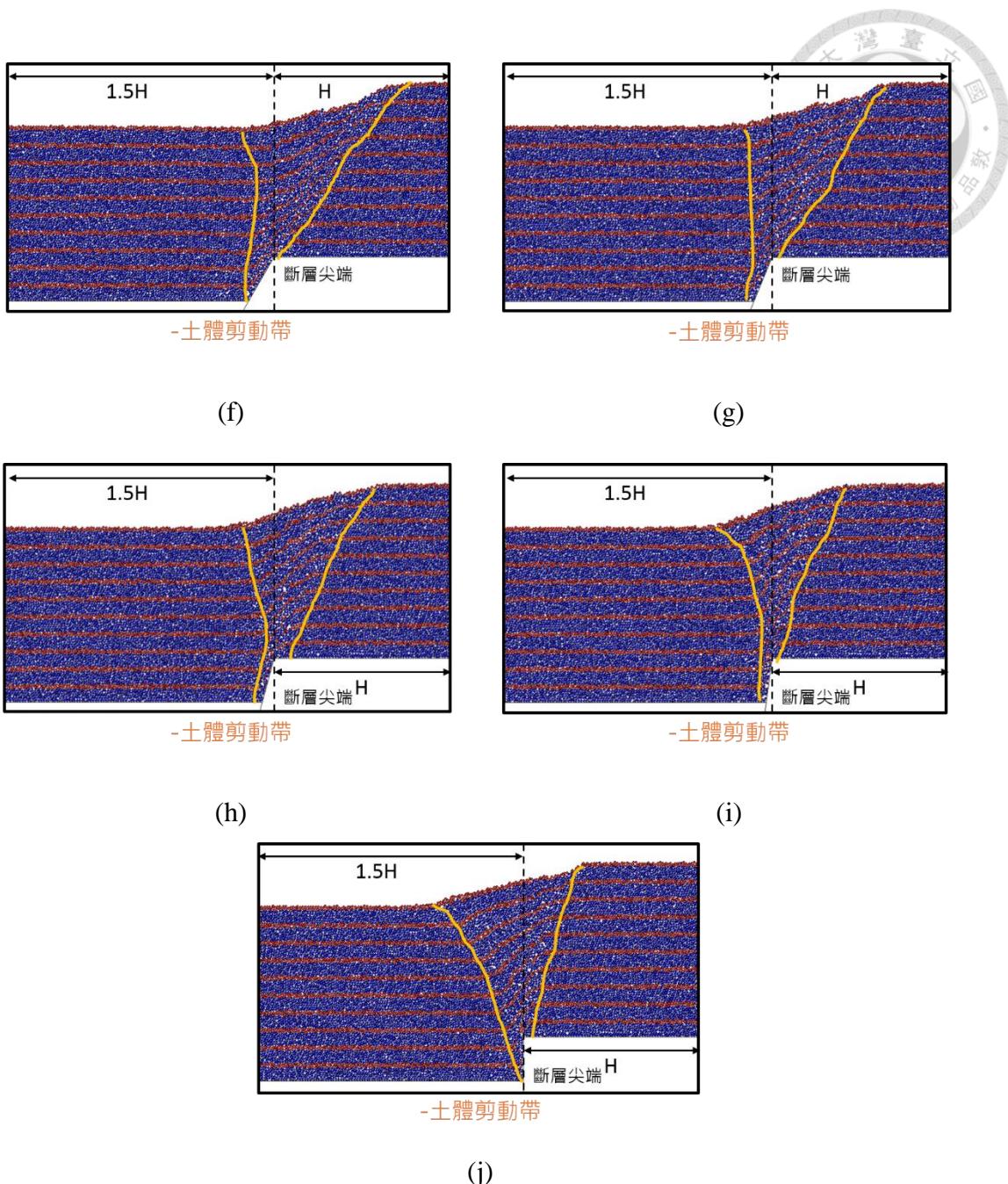


圖 5-23 純砂正斷層於 25g 重力場下不同斷層傾角於錯動率達到 25% 時之  
純砂正斷層變形剖面-2 (f) $60^\circ$  ; (g) $67.5^\circ$  ; (h) $75^\circ$  ; (i) $82.5^\circ$  ; (j) $90^\circ$



### 5.1.5 正斷層錯動引致之地表變形帶

本研究進行數值砂箱模擬，並與前人之物理離心機試驗比對，確認模型之正確性後，改變砂土摩擦角、覆土厚度、斷層傾角等三個變因，斷層面傾角為  $22.5^\circ$  、  $30^\circ$  、  $37.5^\circ$  、  $45^\circ$  、  $52.5^\circ$  、  $60^\circ$  、  $67.5^\circ$  、  $75^\circ$  、  $82.5^\circ$  、  $90^\circ$  ，砂土摩擦角由控制顆粒旋轉比例，參考中央地調所之《重要活動斷層構造特性調查研究-活動斷層近地表變形特性研究》中，控制旋轉比例 0% 、 10% 、 20% 、 30% 、 40% 、 50% 、 60% 、 70% 、 80% 、 90% 、 100% 、對應之摩擦角如表 2-7，重力場  $25g$  、  $50g$  、  $75g$  ，對應之覆土厚為 4 米、 10 米、 15 米。

4.1.3 節中已討論影響範圍的搜尋邏輯，主要以顆粒間斜率超過  $1/150$  、顆粒本身之旋轉角度超過  $\tan^{-1}(1/150)$  、顆粒本身之位移超過模擬所使用之最大粒徑 ( $2.98 \times 10^{-3}m$ )，此三項條件，找出上盤之影響範圍邊界點( $X_h$ )及下盤之影響範圍邊界點( $X_f$ )。斷層尖端投影至地表為 X 軸原點，向下盤方向為正，故  $X_h$  之座標為負值， $X_f$  之座標為正值。

以上述方法套用在本研究針對不同參數之正斷層數值模擬之結果分析，圖 5-20 為不同摩擦角之純砂覆土正斷層，在不同之斷層傾角及不同基盤垂直錯動對土層厚度(H)之正規化比值 r 下，左右 2 條參考線是考量最大之安全係數，即最大影響範圍包絡線，其包絡回歸方程是分別為：

$$F_1 = X_h = -0.0391r(\%) - 0.4273 \dots \dots \dots \text{ (式 4.2-1)}$$

$$F_2 = X_f = 0.0643(\%) + 0.3625 \dots \dots \dots \text{ (式 4.2-2)}$$

其中  $r > 0$

由式 4.2-1 及式 4.2-2 所繪成之砂性土壤最大影響範圍圖如圖 5-20 所示。

如此擴大模擬之結果可見，在傾角  $22.5^\circ$  至  $90^\circ$  、覆土厚 15 米內的純砂正斷層，於上盤的變形帶寬會大於下盤，長度約為 1.55 倍(等於  $F_1$  對  $r$  的斜率除以  $F_2$  對  $r$  的斜率)，且在傾角小於 60 度時，上盤於斷層尖端投影處周圍會有明顯的



地盤產生。

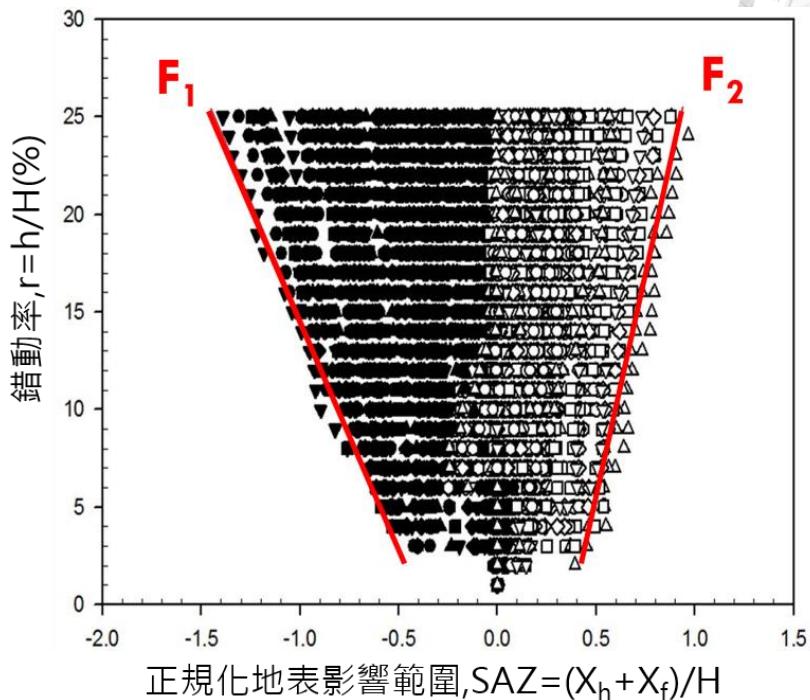


圖 5-24 純砂離心正斷層擴大模擬之正規化地表影響範圍與錯動率之關係

表 5-5 離心純砂正斷層 330 組模擬矩陣

操縱變因	變化參數
斷層傾角	$22.5^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $37.5^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $52.5^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $67.5^\circ$ 、 $75^\circ$ 、 $82.5^\circ$ 、 $90^\circ$
砂土巨觀摩擦角	$33.2^\circ$ 、 $35.1^\circ$ 、 $36.9^\circ$ 、 $40.1^\circ$ 、 $40.9^\circ$ 、 $41.5^\circ$ 、 $47.3^\circ$ 、 $48.5^\circ$ 、 $52.3^\circ$ 、 $54.6^\circ$ 、 $61.4^\circ$
覆土厚度	4 米、10 米、15 米



## 5.2 純黏土質覆土材料

本研究先參考陳榮華(2013)之結果，以數值模擬砂箱重現覆土材料為黏土之物理離心機斷層產狀，確認數值模擬砂箱之正確性。並以 PFC2D 內的破裂斷鍵觀察土體中之剪動帶發展模式。**表 5-6**為陳榮華於 2013 年進行的純黏土覆土材料正斷層離心機物理試驗，不排水剪力強度大概落在 50kPa 及 100kPa 左右。**表 5-7**為數值模型的離心正斷層純黏土總組數模擬矩陣，由純砂數值模型可觀察到，傾角為 60 度時，土中變形帶會影響地表的變形帶寬變化，故黏土數值模型，主要以斷層傾角為 60 度進行模擬，並進行不同重力場，由 25g、50g 至 75g 模擬覆土厚度為 5 米、10 米及 15 米的現地尺度。

表 5-6 前人試驗編號及試驗條件

作者及年份	試驗編號	覆土材料	黏土 $s_u$
陳榮華(2013)	40gNtest32-C	黏土 0.2m	37kPa
	50gNtest36-C	黏土 0.2m	38kPa
	80gNtest37-C	黏土/0.2m	46kPa
	80Ntest44-C-H	黏土/0.2m	116kPa

表 5-7 離心正斷層純黏土總組數模擬矩陣

操縱變因	變化參數
斷層傾角	60°
對應黏土 $s_u$	50kPa、100kPa
覆土厚度	4 米、10 米、15 米



## 5.2.1 與前人之物理離心機試驗比對

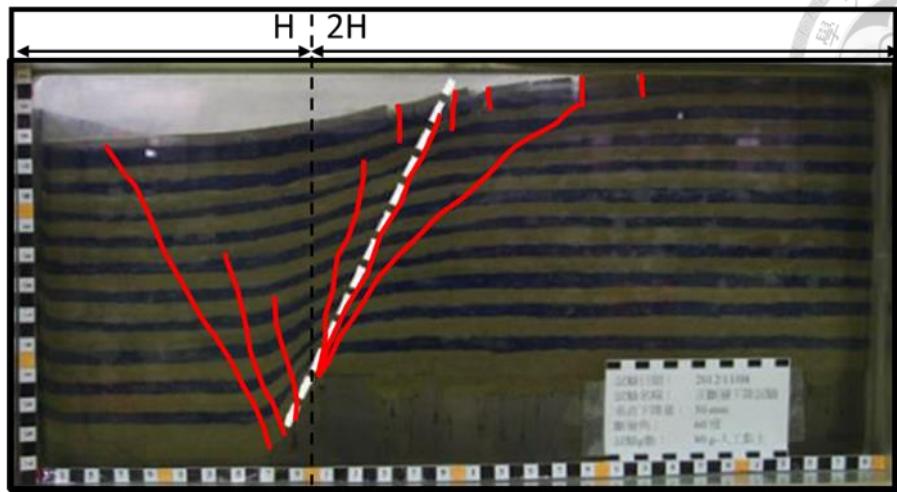
本研究採取陳榮華(2013)完成之純黏土正斷層離心機試驗作為數值模擬黏土材料斷層之驗證，物理離心試驗以本研究之命名，分別是 N60g80C10 及 N60g80C10-H，即斷層傾角為 60 度之純黏土正斷層，於 80g 重力場之試驗，前述兩種不同 g/c 比例的人工黏土，對應之以十字片剪測量得之不排水剪力強度分別為 50kPa 及 100kPa 左右，以下稱低強度及高強度黏土。本研究擷取以上兩組離心機砂箱試驗之地下染色黏土層變位剖面及斷層跡的發展及演化列於**圖 5-21**、**圖 5-22** 的(a)部份，於斷層尖端往上盤方向 1 倍覆土厚及斷層尖端往下盤方向 2 倍覆土厚擷取影像。而本研究之數值模擬砂箱則列於**圖 5-21**、**圖 5-22** 的(b)部份。

**圖 5-21** 的(a)及(b)為 N60g80C10 的離心機與數值砂箱模擬比對，重力場對應之現地覆土厚度為 16 米，虛線是斷層尖端位置，土體內剪動帶由黃色線標記，可見物理離心機砂箱及數值模擬砂箱皆主要有兩條剪動帶，分別始於斷層面(傾角 60 度)與上盤及下盤之交會點，剪動帶左向上盤傾斜，剪動帶右則是向下盤傾角，以斷層尖端為原點，可見下盤的地表影響帶寬較寬。物理砂箱於上下盤皆有地表張力裂縫，但數值砂箱卻無法觀察到，可能原因是數值砂箱將物理砂顆粒的粒徑放大 17 倍，張力裂縫深度若小於顆粒直徑，則會因顆粒定義為剛體無法變形而無法產生地表張力裂縫。且地表之斷層崖也因黏土之強度太低，而無法呈現高角度之形貌。**圖 5-21** 的(c)是數值模擬砂箱的顆粒斷鍵展示，將(b)部分的剪動帶同樣顯示於斷鍵圖中，可見肉眼判釋的剪動帶大致吻合斷鍵邊界。

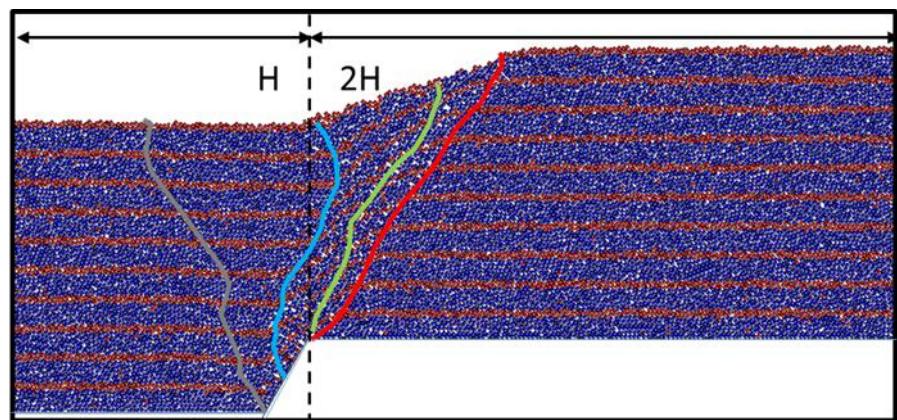
**圖 5-22** 的(a)及(b)為 N60g80C10-H 的離心機與數值砂箱模擬比對，重力場對應之現地覆土厚度為 16 米，虛線是斷層尖端位置，土體內剪動帶由黃色線標記，由物理試驗及數值模擬砂箱的剪動帶都可發現，N60g80C10-H 的產狀與 N60g80C10 有相當大的不同，其剪動帶不一定是全部相連的，且地表出現明顯高



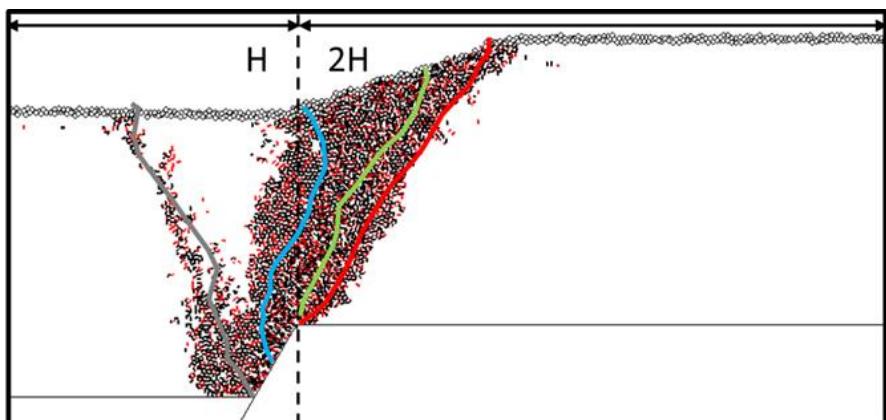
角度的斷層崖，主要是由上盤開始向下錯動後，位於斷層尖端投影處及下盤地表周圍的黏土開始開裂，向上盤翻倒。物理離心機和數值模擬的主要剪動帶都有四條，地表裂縫兩條，集中在斷層尖端投影線附近。



(a)80gNtest37-C,  $s_u=46\text{kPa}$ (陳榮華, 2013)



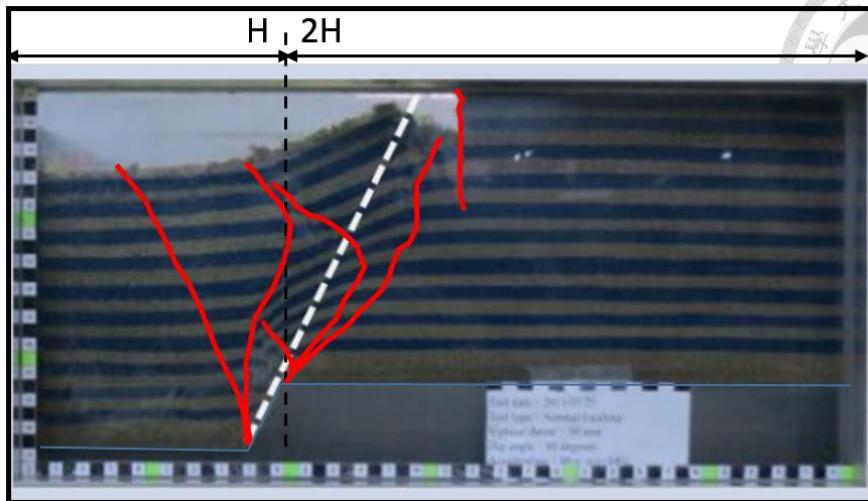
(b)N60g80C10 之土中剪動帶



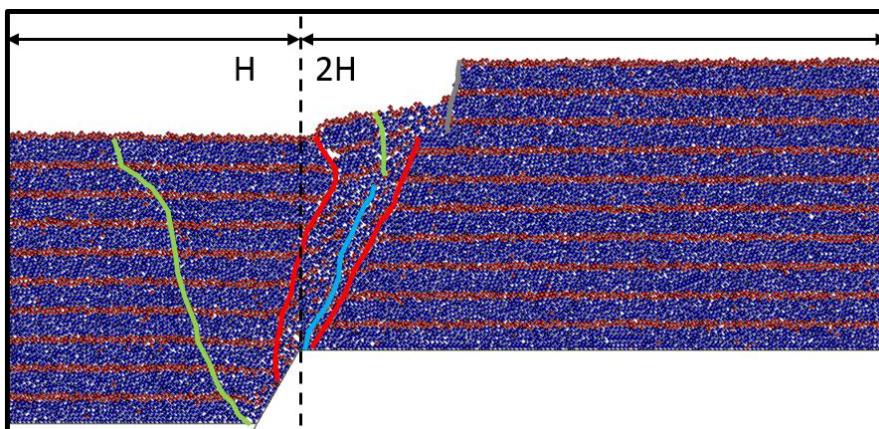
-正向破裂 -切向破裂-剪動帶

(c)N60g80C10 之斷鍵及土中剪動帶

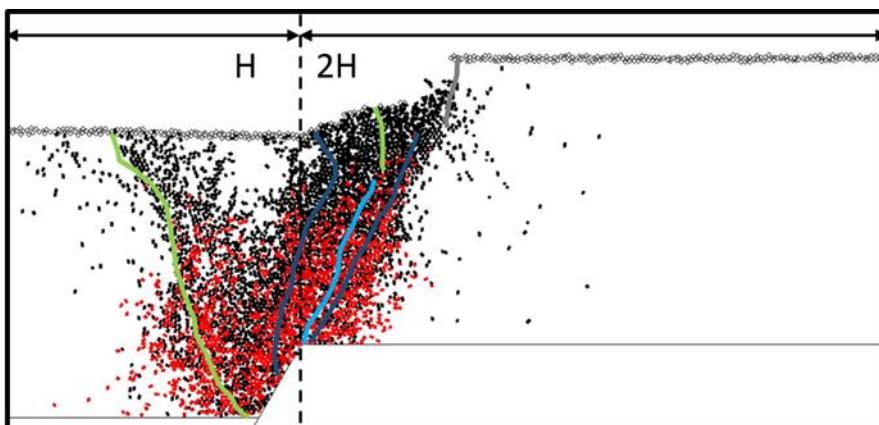
圖 5-25 低強度黏土質覆土材料於傾角 60 度之正斷層之數值與物理試驗比對



(a) 80Ntest44-C-H,  $s_u=116$ kPa(陳榮華, 2013)



(b) N60g80C10-H 之土中剪動帶



-正向破裂 -切向破裂

(c) N60g80C10-H 之斷鍵及土中剪動帶

圖 5-26 高強度黏土質覆土材料於傾角 60 度之正斷層之數值與物理試驗比對



### 5.2.2 改變覆土厚度

在同樣的黏土強度下，改變覆土厚度，其地表產生的張力裂縫位置並不相同。**圖 5-23** 顯示在 10g、30g、60g、80g 重力場下，傾角為 60 度的低強度純黏土正斷層，對應之覆土厚度為 2 米、6 米、12 米、16 米，並在斷層尖端投影線向上盤及下盤各別取 1.5 倍及 1 倍的覆土厚做為截圖邊界。可發現在 10g 重力場環境，及對應現地覆土厚度最淺的數值模型中，張力裂縫深度對於覆土厚的比例最高，且斷層崖非常陡直，幾乎接近 90 度，土中剪動帶的裂縫也很明顯。但隨著覆土厚度增加，如重力場增加到 30g 及 60g，地表的張力裂縫深度開始漸淺，斷層崖的高度減少，30g 重力場模型的斷層崖仍接近垂直，但 60g 重力場模型的斷層崖角度開始漸緩，80g 重力場模型地表幾乎沒有明顯的斷層崖，判斷是因為黏土的強度太低，且數值砂箱將物理砂顆粒的粒徑放大 17 倍，張力裂縫深度若小於顆粒直徑，則會因顆粒定義為剛體無法變形而無法產生地表張力裂縫。

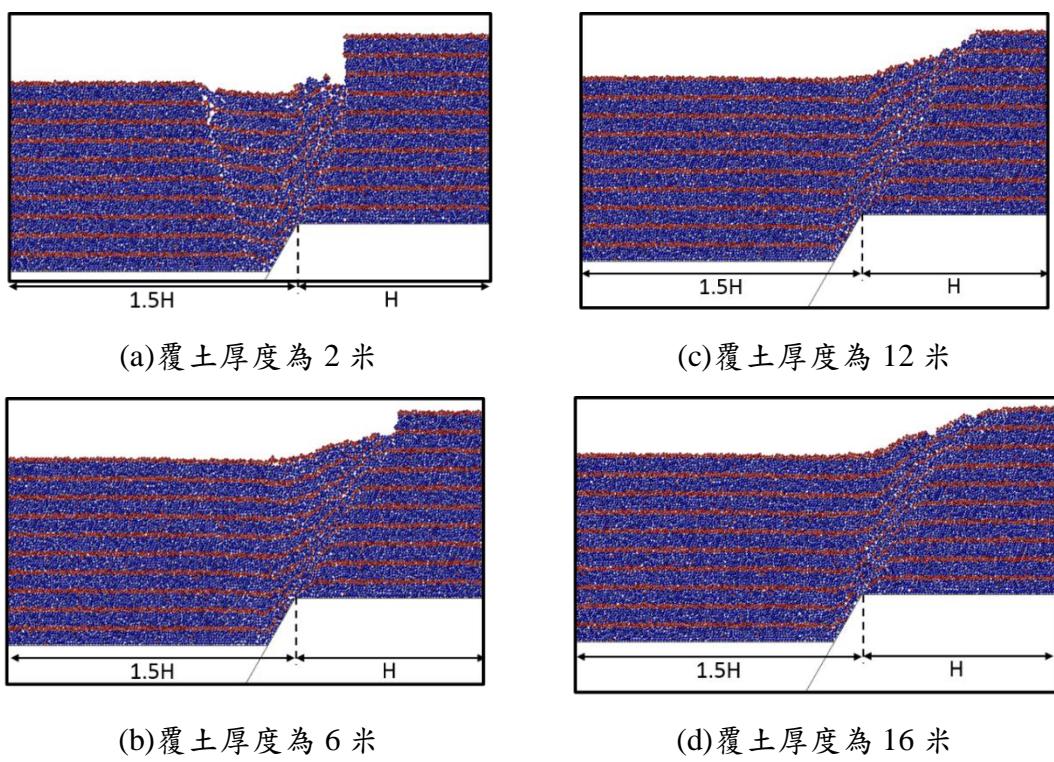


圖 5-27 不同覆土厚度之低強度黏土數值砂箱模擬



### 5.2.3 剪動帶發展趨勢

為觀察凝聚性覆土材料於數值模型中的破壞機制，可由鍵結模型的斷鍵顯示，**圖 5-24** 為低強度黏土質覆土材料於不同錯動率下之斷鍵發展，斷層傾角為 60 度，重力場環境設定為 30g，即總覆土厚為 6 米。

可以發現到，在極小錯動率時，初始剪動帶是由斷層尖端開始發展，如**圖 5-24** 的(a)，但隨後地表便會產生張力裂縫，錯動率繼續增加，則會使初始剪動帶與地表之張力裂縫相連。**圖 5-24** 的(b)到(d)部份，便是在說明以上情形，地表張力裂縫發展不只一條，但都會與初始剪動帶相連。主要原因判斷為，當地表張力裂縫產生後，對於土體而言，是一相對之弱面，而力通常會向強度較低的地方先行傳遞，故剪動帶會向張力裂縫的底部發展。當錯動率達到一定程度後，顆粒鍵結斷層便是在剪動帶內重複發生，較不會發展新的剪動帶，如**圖 5-24** 的(e)到(h)部份。

不同錯動時期引致的斷鍵位置也是一關心重點，**圖 5-25** 便列出每一個錯動歷程的斷鍵增量，如**圖 5-25** 的(b)為錯動率等於 0.4% 至 0.8% 時，產生的斷鍵，便是**圖 5-24** 的(b)減去**圖 5-24** 的(a)所得，可以發現這時地表的斷鍵開始增加，便是地表張力裂縫，至**圖 5-25** 的(c)及(d)時，斷鍵叢聚地更加明顯，且開始有相連的情形。**圖 5-25** 的(e)及(h)的斷層增量則是集中在原先的剪動帶範圍內，不再由斷層尖端發展新的剪動帶。

**圖 5-26** 為 N60g30C10 斷層模型於不同錯動率下，鍵結斷鍵與錯動率之關係，除了**圖 5-24** 及**圖 5-25** 之斷鍵位置觀察，也可以由斷鍵數量發展證明。如錯動率為 5% 時，斷鍵數目約為 3000 個，但錯動率達到 20% 時，斷鍵數目卻不到 6000 個，且若繼續增加錯動率，斷鍵增量會逐漸減少，在錯動率 25% 時，斷鍵數目趨近於一定值，符合**圖 5-24** 及**圖 5-25** 之觀察。

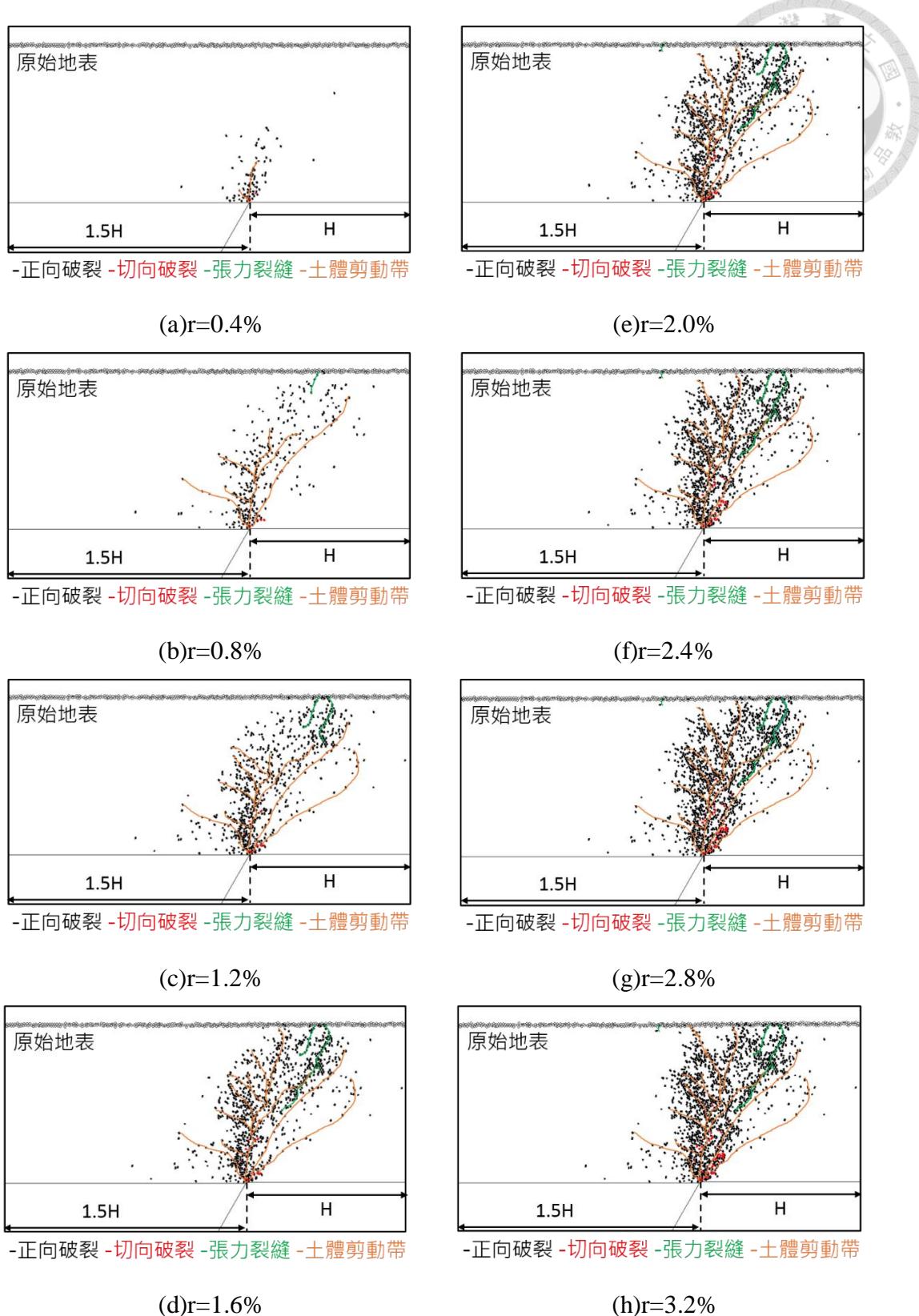


圖 5-28 傾角 60 度低強度黏土質覆土材料於不同錯動率下之斷鍵發展

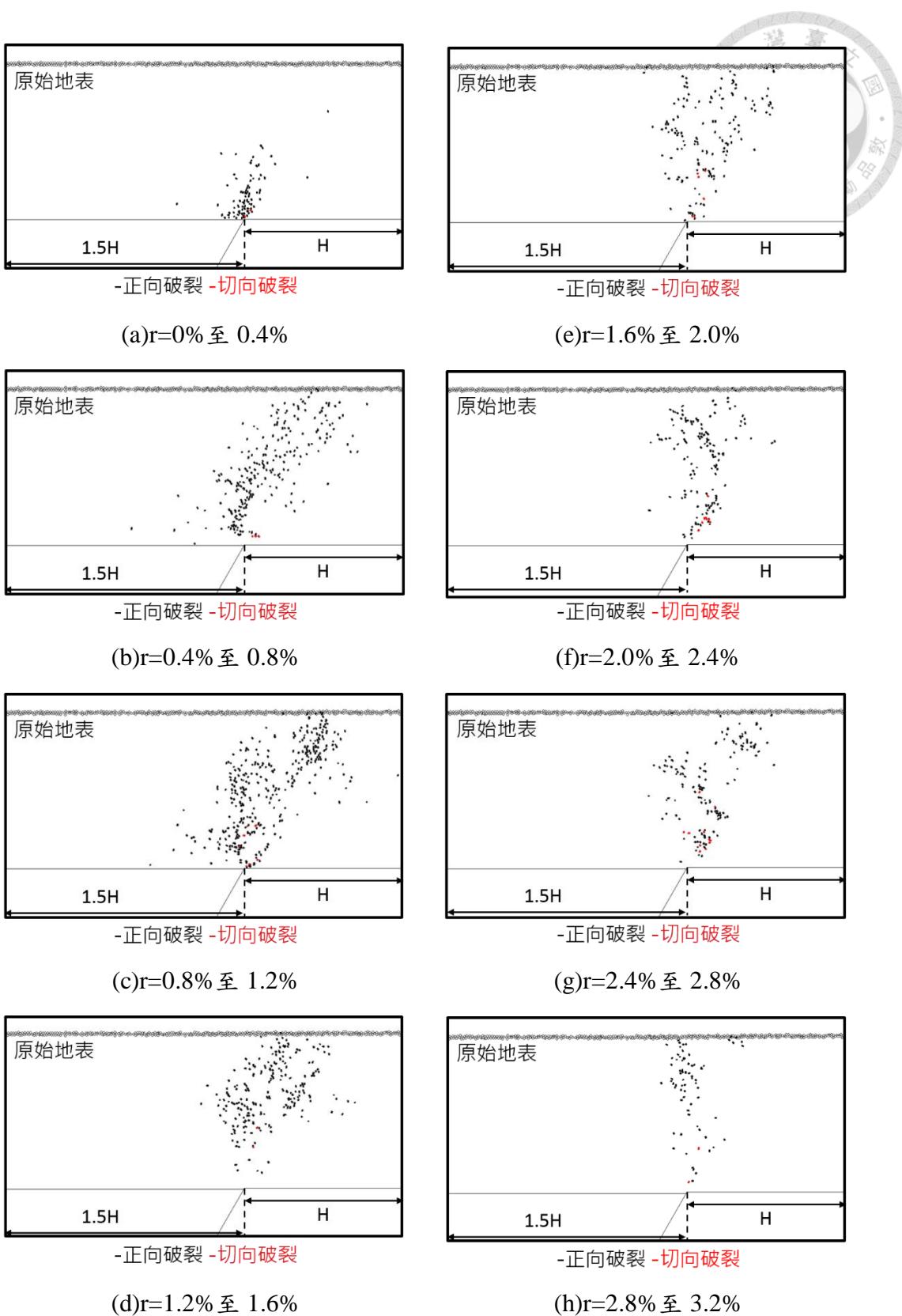


圖 5-29 傾角 60 度低強度黏土質覆土材料於不同錯動率下之斷鍵增量發展

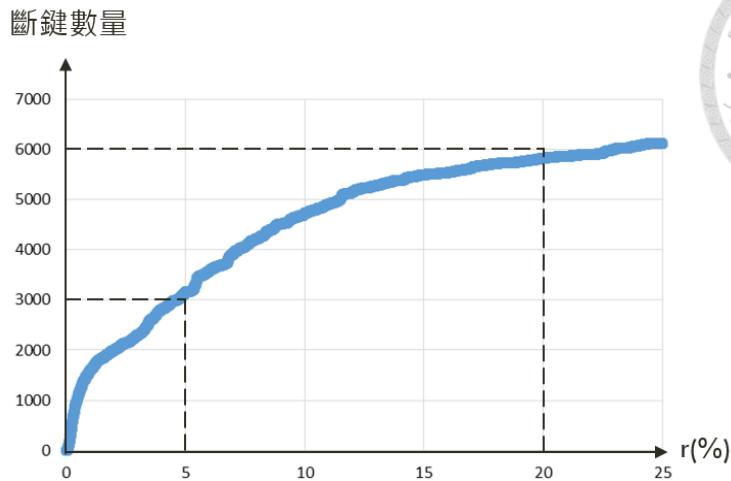


圖 5-30 傾角 60 度低強度黏土質覆土材料於不同錯動率下之斷鍵數量

### 5.3 複合覆土材料

本節針對黏土層覆蓋砂土層的互層地盤，進行正斷層錯動離心模型試驗。探討此類互層地盤受到正斷層錯動後，地表變形及地下錯動剖面的演化，並進行相互比較。**表 5-8** 為本系列正斷層錯動試驗參考之前人試驗編號及試驗條件列表。

表 5-8 前人試驗編號及試驗條件

作者及年份	試驗編號	上層覆土	下層覆土	黏土 $s_u$
陳榮華(2013)	80gNtest59-S/C	砂(10cm)	黏土(10cm)	107kPa
	70gNtest80-C5/S5-H	黏土(10cm)	砂(10cm)	95kPa
張庭傑(2014)	70gNtest82-C5/S5	黏土(10cm)	砂(10cm)	62kPa
	70gNtest81-C3/S7	黏土(6cm)	砂(14cm)	99kPa

#### 5.3.1 與前人之物理離心機試驗比對

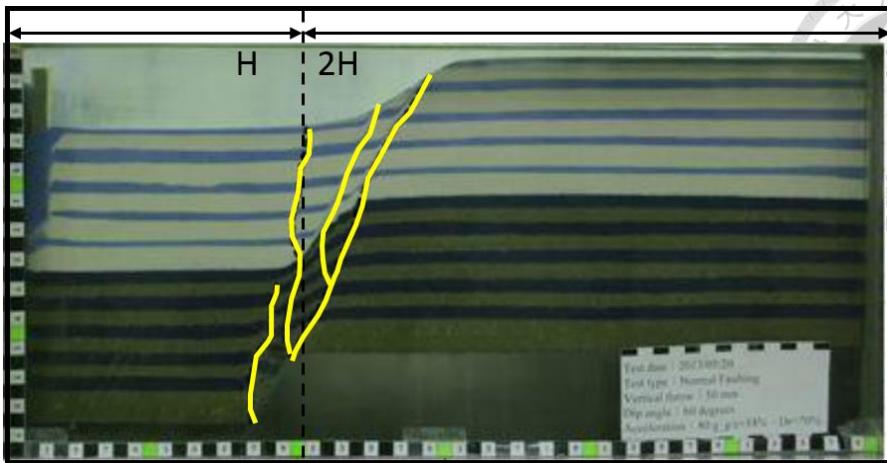
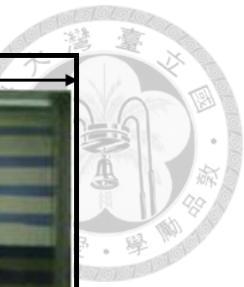
本研究參考中央大學團隊，陳榮華(2013)的 80gNtest59-S/C 及張庭傑(2014)的 70Ntest82-C5/S5 的物理離心機砂箱試驗做為驗證，**圖 5-27 至 圖 5-29** 分別為砂土



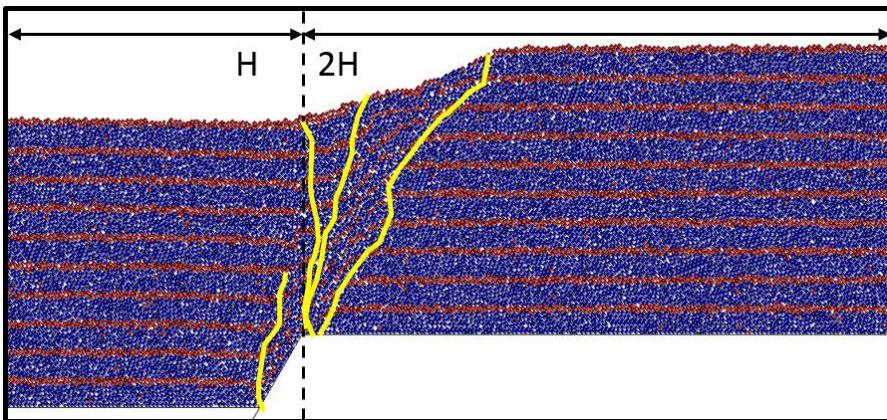
覆蓋低強度黏土之離心正斷層及低強度黏土覆蓋砂土之離心正斷層的數值模擬砂箱與物理試驗比較。

在砂土覆蓋低強度黏土的模型中(見**圖 5-27**)，不論是物理離心機試驗或是數值模擬，其地表起伏都由砂性材料的安息角控制，離心機物理模擬因為黏土受砂土的重量及離心環境束制，變形帶較窄，於黏土層中大致可描繪出四條，主要由斷層尖端發展，數值模擬的黏土層也是四條由斷層尖端發展的剪動帶，但同時可觀察其斷鍵情形，發現在剪動帶外的顆粒仍存在斷鍵現象，表示顆粒接的微裂隙不容易由肉眼觀察，此時數值模擬便可展現實際的破壞範圍。而在砂土及黏土交界處，物理離心機試驗發現剪動帶內的黏土會有階梯狀的變形(見**圖 5-28**)，但數值模擬無法觀察到，其原因可能為顆粒過大，或是該階梯狀變形是塑性發展，故先前設定的接觸模式便無法完全模擬該產狀。

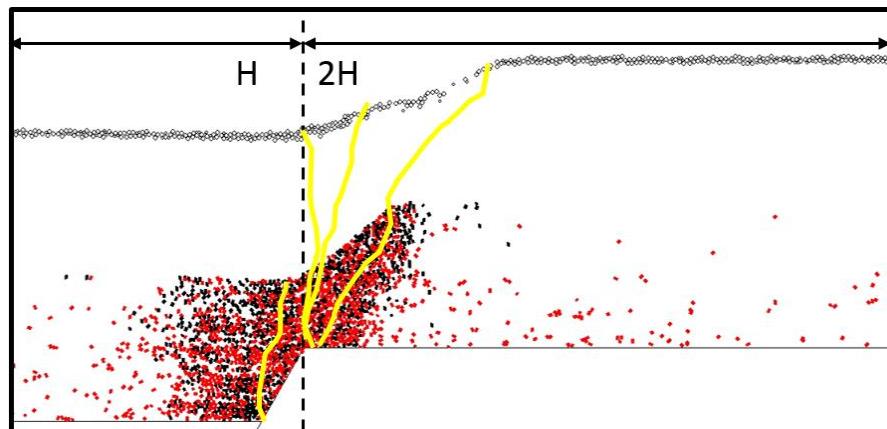
而**圖 5-29**是低強度黏土覆蓋砂土的離心正斷層模型，物理離心機及數值模擬砂箱都有明顯的地表斷層崖，深度約到第三層顆粒材料，剪動帶在砂土層內主要有兩條，但到黏土層開始出現分支，且上盤之地表處皆有張力裂縫產生。將數值模擬肉眼判釋的剪動帶疊合至斷鍵圖上，也幾乎吻合。



(a)80gNtest59-S/C(陳榮華，2013)

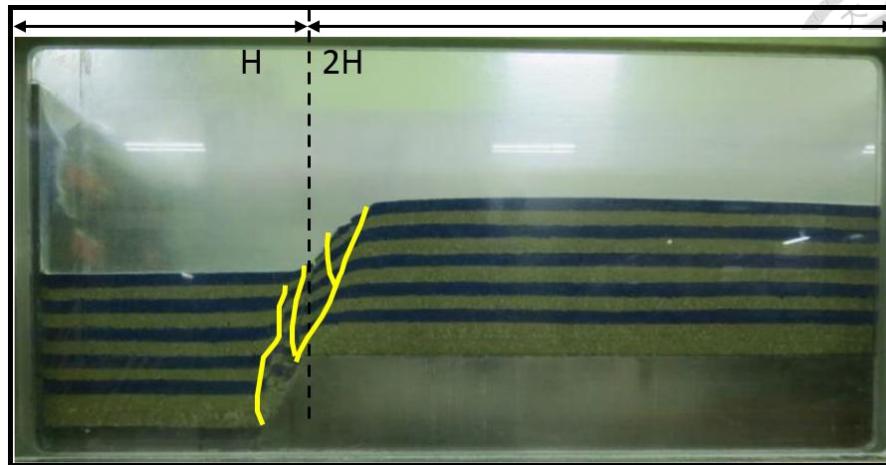


(b)N60g80S5C5 之土中剪動帶

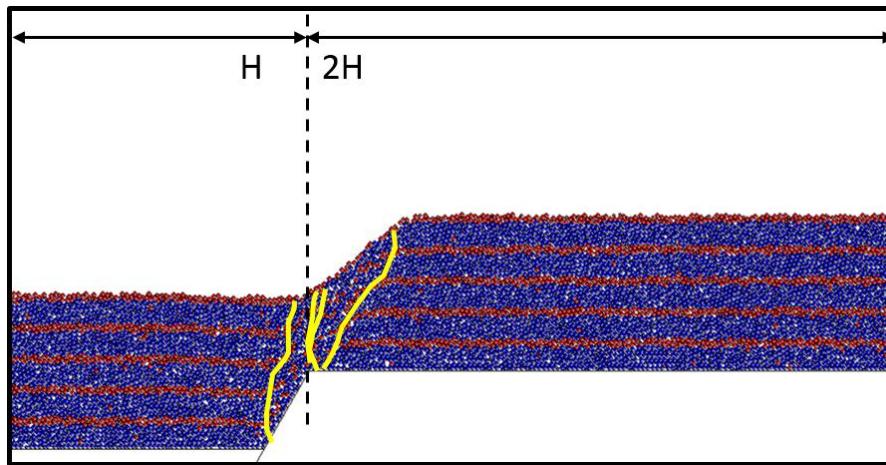


(c)N60g80S5C5 之斷鍵及土中剪動帶

圖 5-31 砂土層覆蓋低強度黏土層之離心機正斷層數值與物理試驗比較

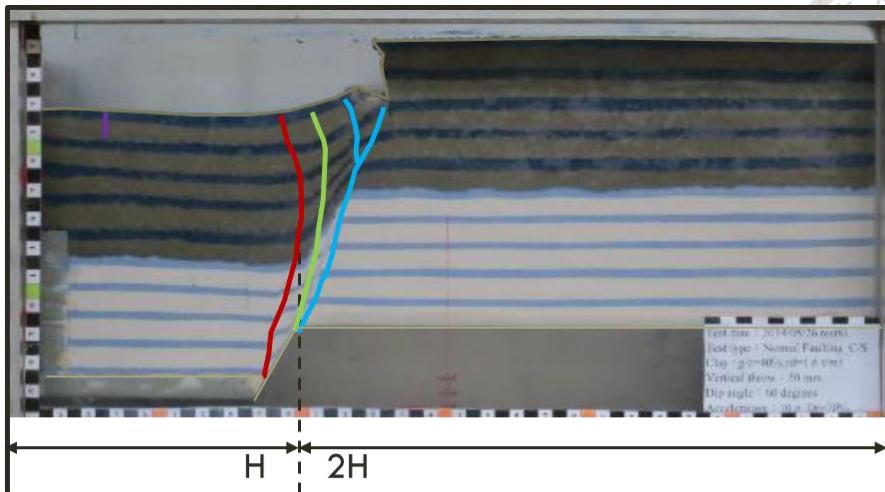


(a)80gNtest59-S/C 錯動後的黏土層特寫(陳榮華，2013)

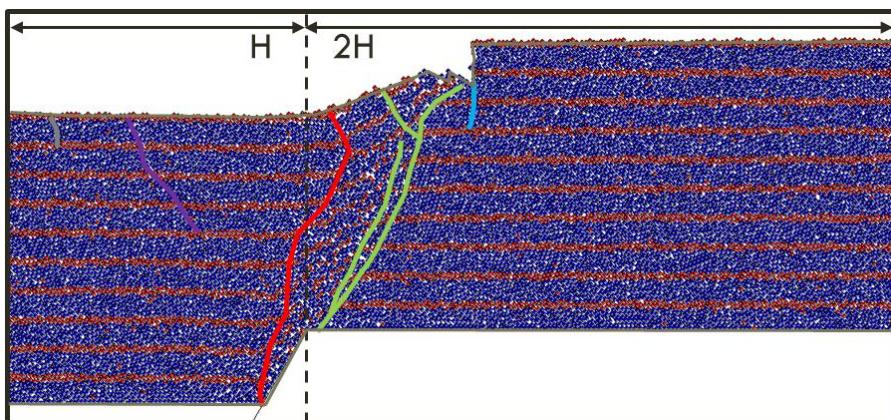


(b)N60g80S5C5 的黏土特寫

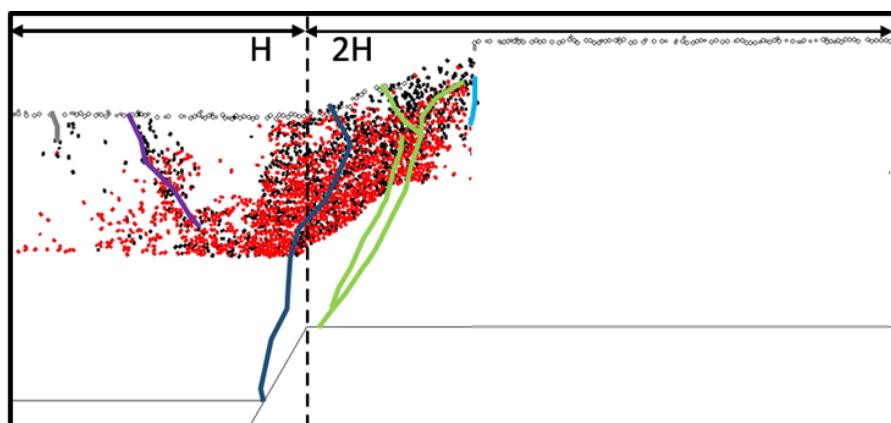
圖 5-32 砂土層覆蓋低強度黏土層離心機正斷層之黏土層特寫



(a)70Ntest82-C5/S5(張庭傑，2014)



(b)N60g80C5S5 之土中剪動帶



-正向破裂 -切向破裂

(c)N60g80C5S5 之斷鍵及土中剪動帶

圖 5-33 低強度黏土層覆蓋砂土層之離心機正斷層數值與物理試驗比較



## 第6章 離心機生長正斷層之數值模擬成果

數值模擬工具具有不同於一般物理試驗的易操作性，尤其以個別元素法做為模擬工具，且可直接量測顆粒的位移、受力、破裂斷鍵等。目前之離心機試驗，並無法進行生長斷層模擬，主因為斷層受重力場下而錯動後，若要以人工重新賣降鋪設生長之覆土材料，則需停止離心機運轉，將整個砂箱模型再次置於 1g 之重力環境下，越多層生長斷層，則需重覆以上動作越多次，試體反覆受到不同的大幅應力場變化，可能會引致非錯動而產生的土體變形，使觀測產生誤差。故應用個別元素法於砂箱模擬，其一優勢便是能於離心環境下錯動後，停止模型計算，固定原先的顆粒材料，而後重新賣降生長地層，相對於離心機物理試驗，是較為便利的。

### 6.1 模擬離心機之生長正斷層

#### 6.1.1 模型建立

本研究比照離心機正斷層模型之尺度，設計在 1g 狀態下，一寬 1 米之模型，斷層傾角 60 度(見圖 6-1)，以重力賣降方式產生覆土層，共生長及錯動斷層基盤各 10 次，每次的生長下盤覆土厚為 0.02 米，對應之實際錯動距離為 0.005 米，進行 10 次生長地層後，下盤的總覆土厚為 0.2 米，總錯動與離心機正斷層模型相同，為 0.05 米，以做為成果比對。

離心機生長正斷層之覆土材料分為無鍵結力的純砂土層，及具有鍵結力的純黏土層，台北盆地黏性土壤之  $s_u$  值有隨地表高程遞減而成線性增加之特性(王獻增，2000)。地表之單壓強度為，且強度隨深度而線性變化，參考公式為不排水剪力強度與地表高程比值  $s_u/\sigma'_{vo}=0.2$ ，一般為軟弱黏土。以 40g 之重力場(對應現地覆土為 16 米)環境下，將前述第 4 章之數值單壓結果，設定接觸鍵結強度及切向



鍵結強度如表 6-1。

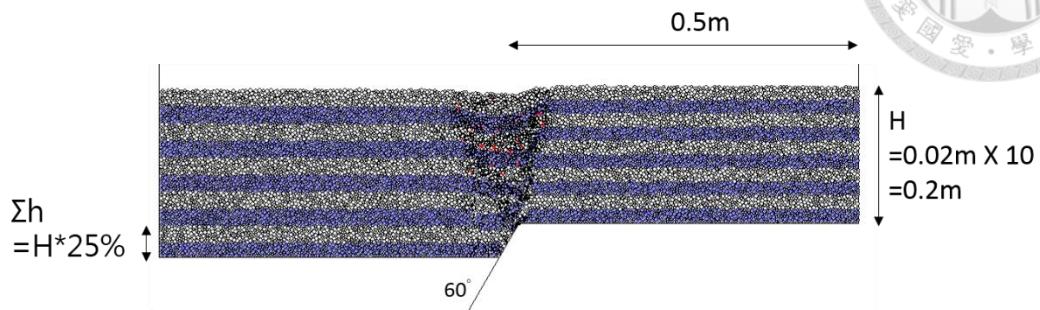


圖 6-1 數值離心生長正斷層之模型示意圖

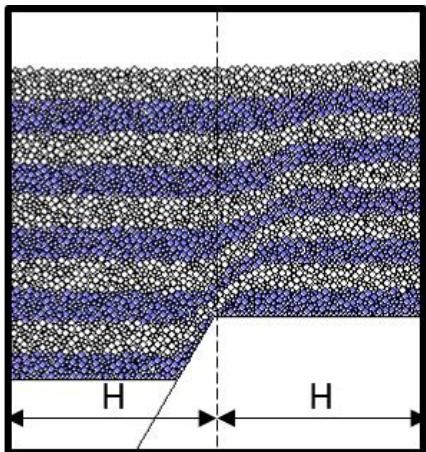
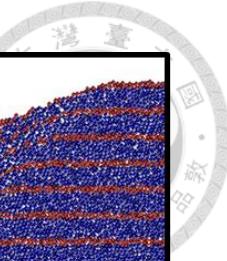
表 6-1 凝聚性覆土離心生長正斷層之材料參數

深度	正向/切向 鍵結強度(N)	$q_u$	$s_u$
		(kPa)	(kPa)
0-3m	60/90	30	15
3-6m	80/120	44	22
6-10m	100/150	54	27
10-13m	150/225	88	40
13-16m	200/300	120	60

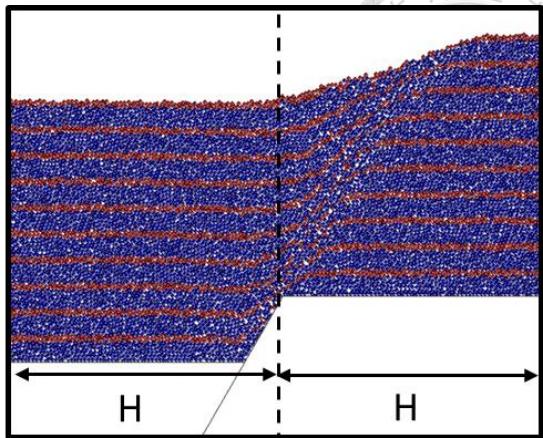


### 6.1.2 與無生長地層之離心機正斷層比對

為與無生長地層之離心機斷層比對其產狀差異，**圖 6-2** 擷取 40g 重力場下，傾角為 60 度之純砂正斷層，有無生長地層之錯動完成結果。**圖 6-2** 的(a)部份為具生長地層之模型，共生長及錯動 10 次，故編號為 N60g40S10-grwoth10；(b)是無生長地層之離心機正斷層模型，編號為 N60g40S10。各以斷層尖端左右各 1 倍覆土厚之距離為邊界，判釋其產狀。由圖可見，具有生長地層的模型，在覆土較深(靠近基盤)處，有土層遭擠壓拉伸之情形，使層面為傾斜狀，接近斷層傾角，但剪動帶以外之層面仍維持水平，且越往地表，剪動帶內的層面傾斜角度又開始漸緩，最靠近地表之層面幾乎無傾斜，接近水平，此和朱聖心(2013)進行之山腳斷層五股剖面模擬一致，其鑽探結果顯示(見**圖 6-3**，岩心箱照片擷取自朱聖心，2014)，在 SCF-2 鑽孔之 137 至 156 米，具有層面傾斜及正斷層的小構造，但接近地表處則無。於非生長地層之模型，也具有剪動帶內層面傾斜之產狀，但是在基盤處至地表，剪動帶內層面的傾角皆接近斷層傾角，並無類似生長斷層有層面漸緩之情形。此外，具有生長地層之純砂覆土材料正斷層，在同樣的覆土厚及總錯動率下，其地表起伏會較無生長地層之模型小。



(a)N60g40S10-grwoth10



(b)N60g40S10

圖 6-2 數值離心純砂正斷層有無生長地層之比較(a)具生長地層並錯動

共 10 次(b)無生長地層一次錯動完成

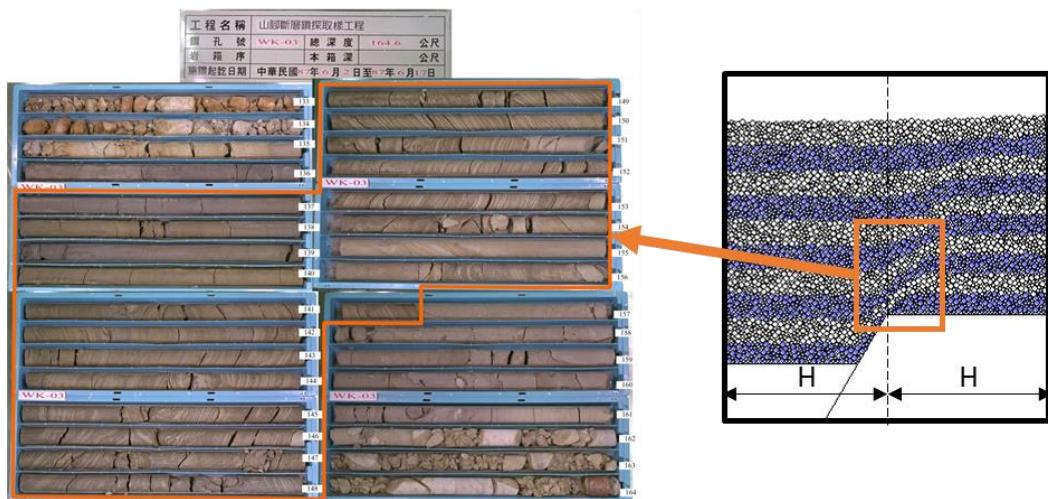


圖 6-3 離心機之生長正斷層模擬與岩心照片之比較



### 6.1.3 具凝聚性及非凝聚性覆土之離心生長正斷層

圖 6-4 及圖 6-5 為 N60g40S10-grwoth10 生長並錯動 1 至 10 次的產狀，在(a)

第一次生長錯動至(b)第二次生長錯動時，層面傾角開始傾斜，但初始角度較緩，隨著生長錯動次數增加，剪動帶內的土層受擠壓拉伸，靠近基盤的層面角度也開始接近斷層傾角，但靠近地表處，則沒有較明顯的變形。

而具有黏土覆土層之離心生長正斷層之產狀，則是列於圖 6-6 及圖 6-7，同樣為生長並錯動 1 至 10 次的產狀於離心黏土正斷層之生長地層模擬中，可發現剪動帶會沿著原先斷鍵集中處發展，故先前錯動引致的斷鍵位置，會影響下一次錯動的剪動帶發育。於黏土覆土層之離心生長正斷層中，亦可發現靠近基盤的層面有傾斜之情形，但變形帶發展還是受控於凝聚性材料的性質，因黏土的強度隨深度而線性增加。圖 6-6 的(a)及(b)，斷層崖因錯動量較小，而無法發展，但圖 6-6 的(c)至(e)，則可發現材料因具凝聚性，而不受錯動掉落，增加生長地層及錯動量後，才由層面開始塊狀掉落，後續(f)至(j)的生長地層，則因強度較低，沒有上述之情形。

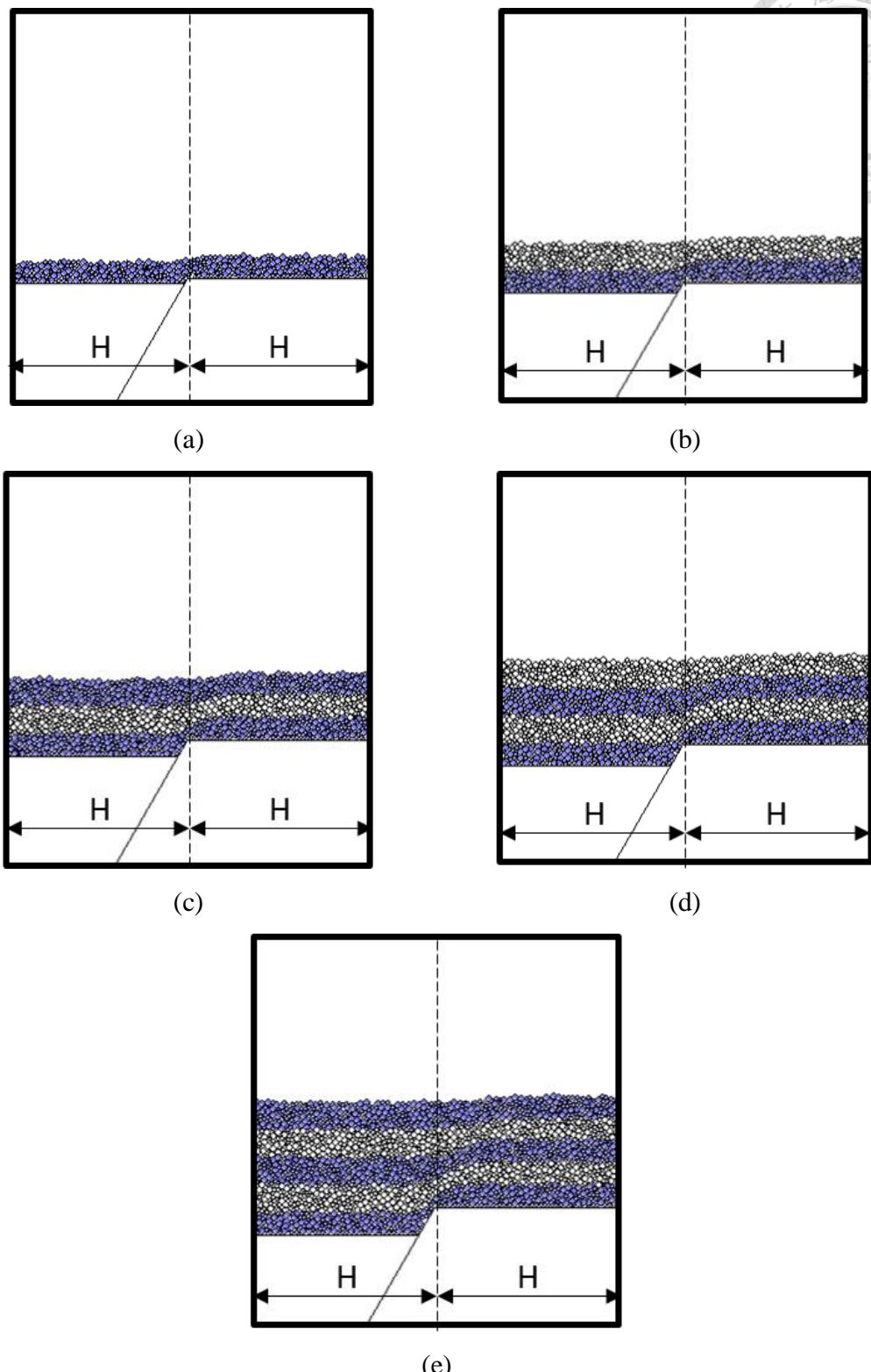
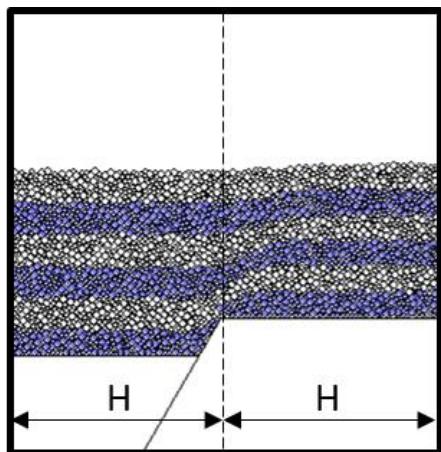
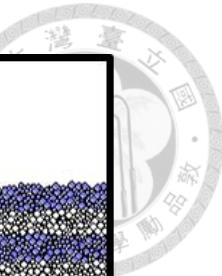
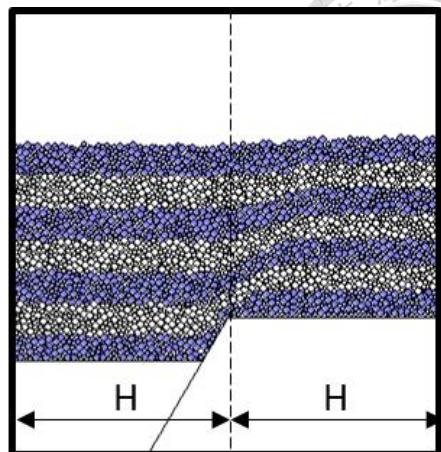


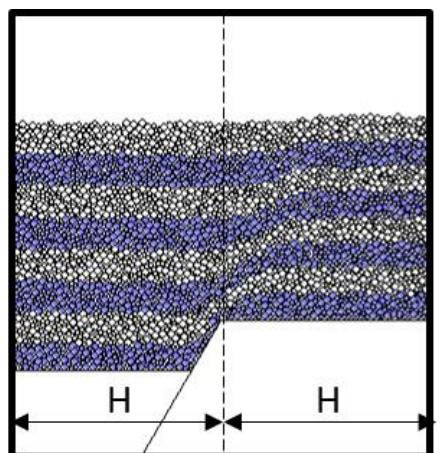
圖 6-4 數值離心純砂正斷層具 10 次生長地層之沉積錯動產狀-1(a)至(e)依序為生長並錯動完成 1 至 5 次



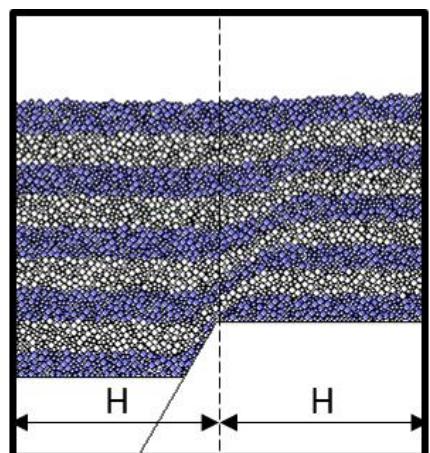
(f)



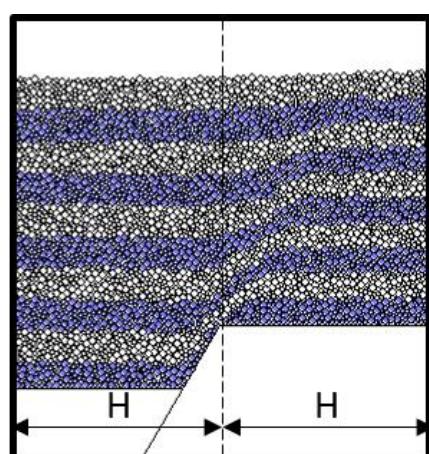
(g)



(h)



(i)



(j)

圖 6-5 數值離心純砂正斷層具 10 次生長地層之沉積錯動產狀-2(f)至(j)依序  
為生長並錯動完成 6 至 10 次

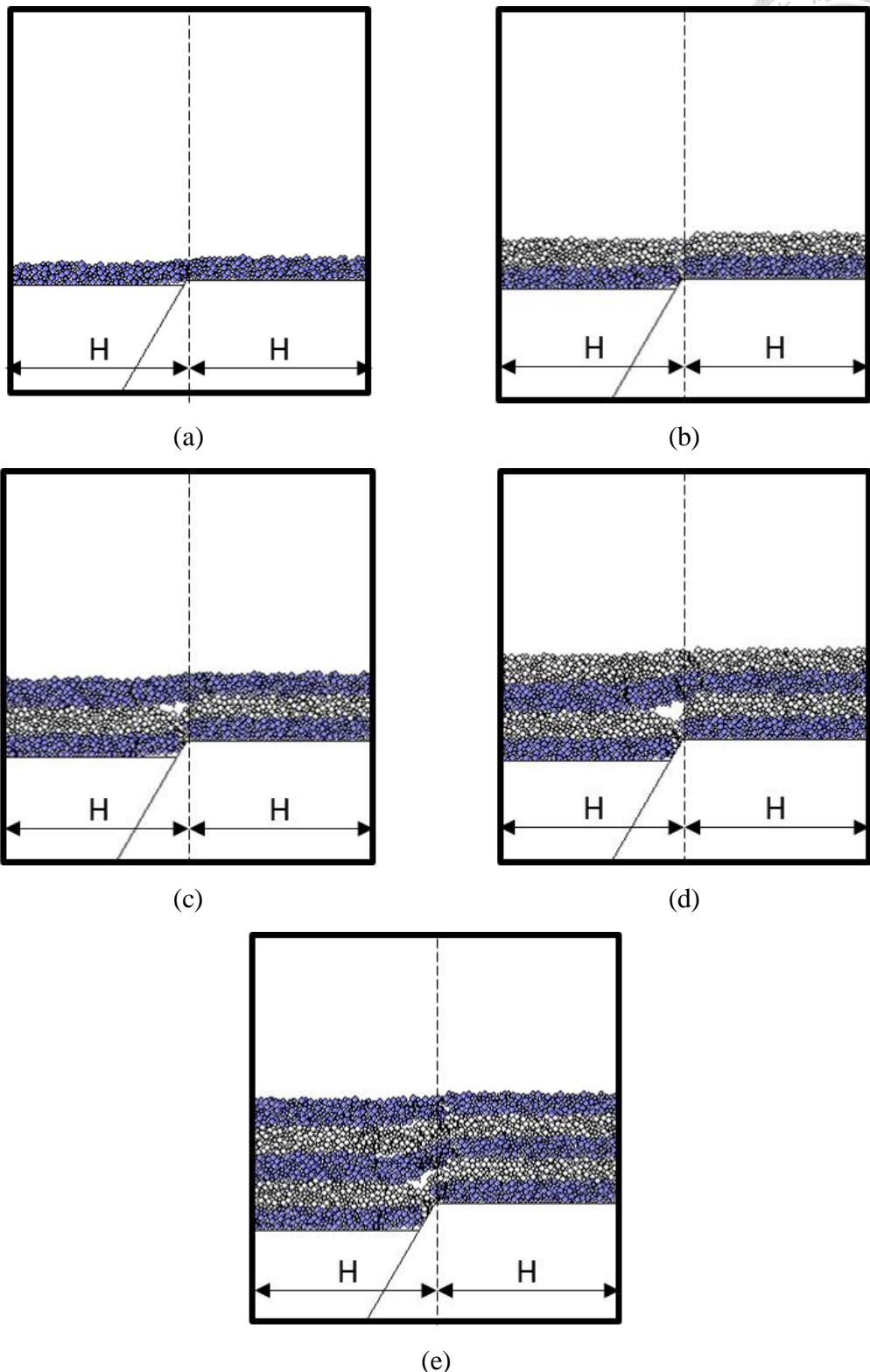


圖 6-6 數值離心純黏土正斷層具 10 次生長地層之沉積錯動產狀-1(a)至(e)

依序為生長並錯動完成 1 至 5 次

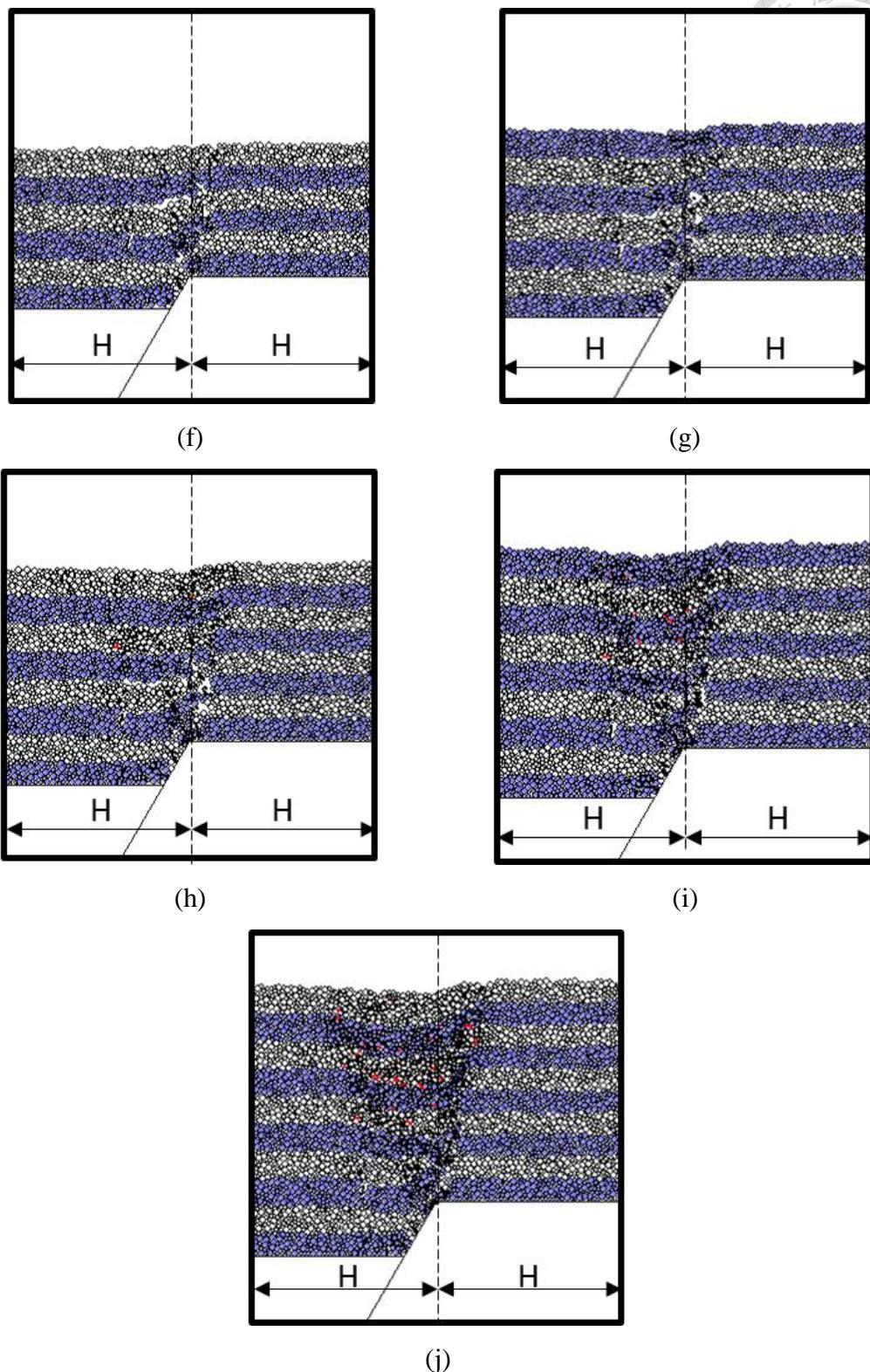
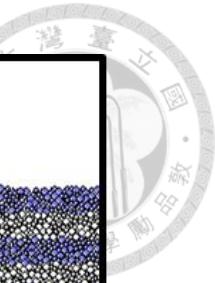


圖 6-7 數值離心純黏土正斷層具 10 次生長地層之沉積錯動產狀-1(a)至(e)

依序為生長並錯動完成 6 至 10 次

## 第7章結論與建議



### 7.1 結論

1. 證明應用個別元素法及數值模擬工具於離心機斷層模擬有其可行性。
2. 於離心黏土正斷層模擬中，地表會形成高角度斷層崖，且可見地表張力裂縫在極小錯動率便會產生，並與斷層尖端發展出的初始剪動帶相連為主要剪動帶。且產狀與物理離心機相符。
3. 於離心黏土正斷層之生長地層模擬中，地表會形成高角度斷層崖，可發現剪動帶會沿著原先斷鍵集中處發展，故先前錯動引致的斷鍵位置，會影響下一次錯動的剪動帶發育。

### 7.2 建議

1. 可於砂性覆土材料及黏土材料中繪製應變椭圓帶，觀察其剪應變及剪動帶之關係。
2. PFC2D 內有簡單韌性模型(simple ductile model)，可使接觸鍵結模式之力學行為具韌性，可使數值內的顆粒破壞機制更接近人工黏土。



## 參考文獻

- Bjerrum, L., 1963, Allowable Settlement of Structures. Proc., European Conf. on Soil Mech. and Found. Engr., Weisbaden, Germany, Vol. 3, pp. 135-137.
- J. D. Bray et al., 1994, Earthquake Fault Rupture propagation through Soil. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120, No. 3, March 1994, pp. 543-561,
- Lee, J., Hamada, M., Tabuchi, G. and Suzuki, K., 2004, Prediction of fault rupture propagation based on physical model tests in sandy soil deposit. Proceedings of the 13th world conference on earthquake engineering, paper.
- Itasca, 2004, PFC2D menunal version 3.0.
- Rayhani, M.H.T., and El Naggar, M.H., 2007, Characterization of glyben for seismic applications. Geotechnical Testing Journal, ASTM, Vol.31, No.1, pp. 24-31.
- 林朝榮，1957，臺灣地形。臺灣省文獻委員會，共 424 頁。
- 王執明、鄭穎敏、王源，1978，台北盆地之地質及沉積物之研究。臺灣礦業，30 卷，4 期，78-108 頁。
- 劉桓吉、蘇泰維、李錦發、紀宗吉、林朝宗，2000，山腳斷層之活動性及其對工程安全之影響。經濟部 89 年度研究發展專題報告，第 89-015 號。
- 蔣佳興，2006，正斷層錯移對上覆砂土層之變形行為探討。國立臺灣大學土木工程學系，碩士論文。
- 陳師賢，2007，結合物理試驗與數值模型模擬山腳斷層上覆土層變形行為。國立臺灣大學土木工程學系，碩士論文。
- 謝昭輝、謝盛雄、戴榮興，2000，山腳斷層震測調查研究。中國地質學會 89 年年會論文集，147-150 頁。
- 王獻增，2000，台北盆地黏性土壤不排水剪力強度之研究。國立中央大學土木工程學系，碩士論文。



鍾春富、林銘郎，2004，機率式斷層位移危害度分析初探。岩盤工程研討會論文集，  
216-223 頁。

經濟部中央地質調查所，2004，活動斷層調查報告——山腳斷層。經濟部中央地質  
調查所施政計畫報告。

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系，博士論文。

陳榮華，2013，以離心模型模擬正斷層及逆斷層通過黏土地層引致的地表變形特性。  
國立中央大學土木工程學系，碩士論文。

經濟部中央地質調查所，2013，102 年度委辦計畫期末報告活動斷層近地表變形特  
性研究。

經濟部中央地質調查所，2014，103 年度委辦計畫期末報告活動斷層近地表變形特  
性研究。

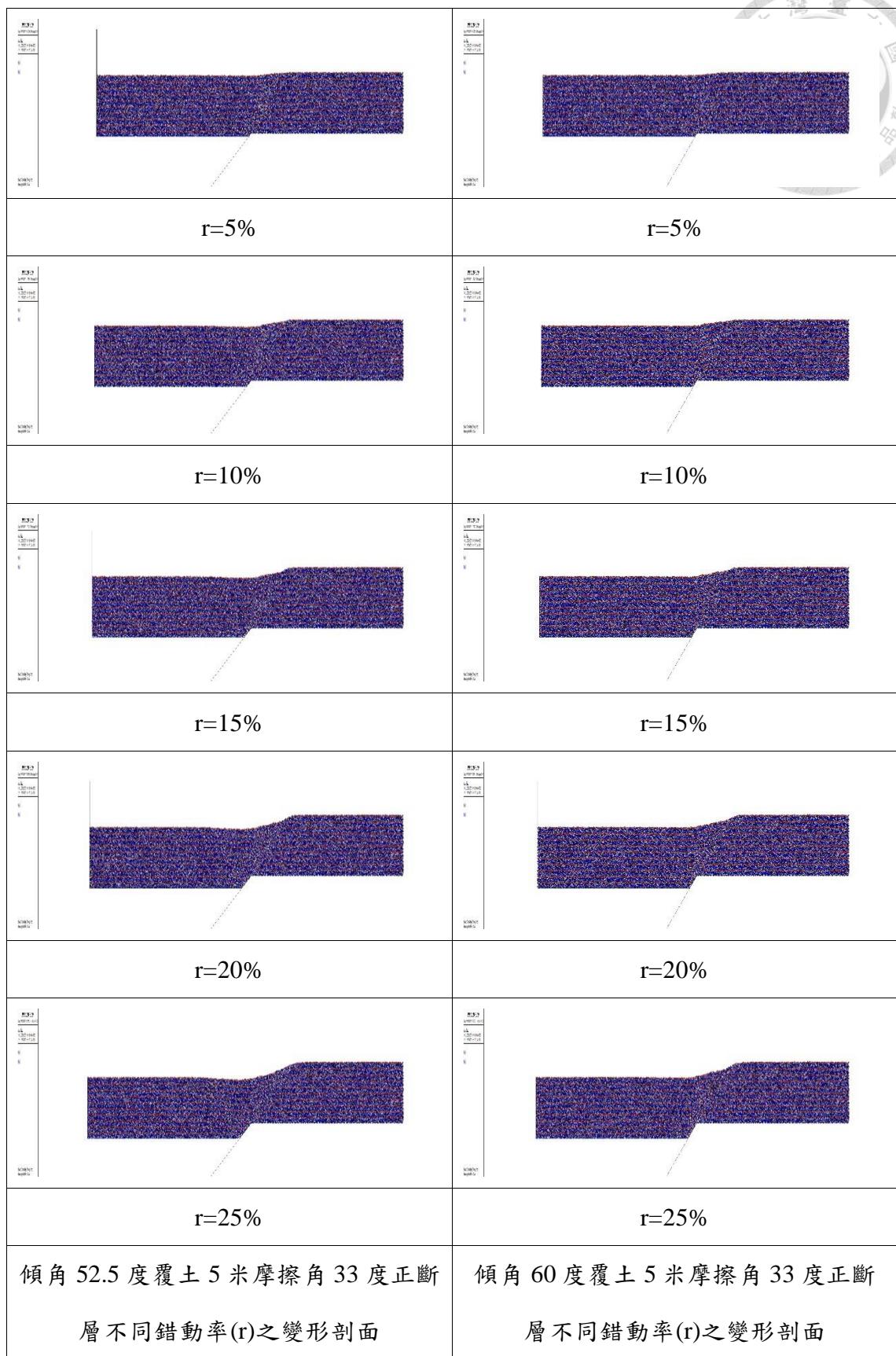
朱聖心，2014，生長正斷層錯動引致覆土層剪切帶發展之研究。國立臺灣大學土木  
工程學系，博士論文。

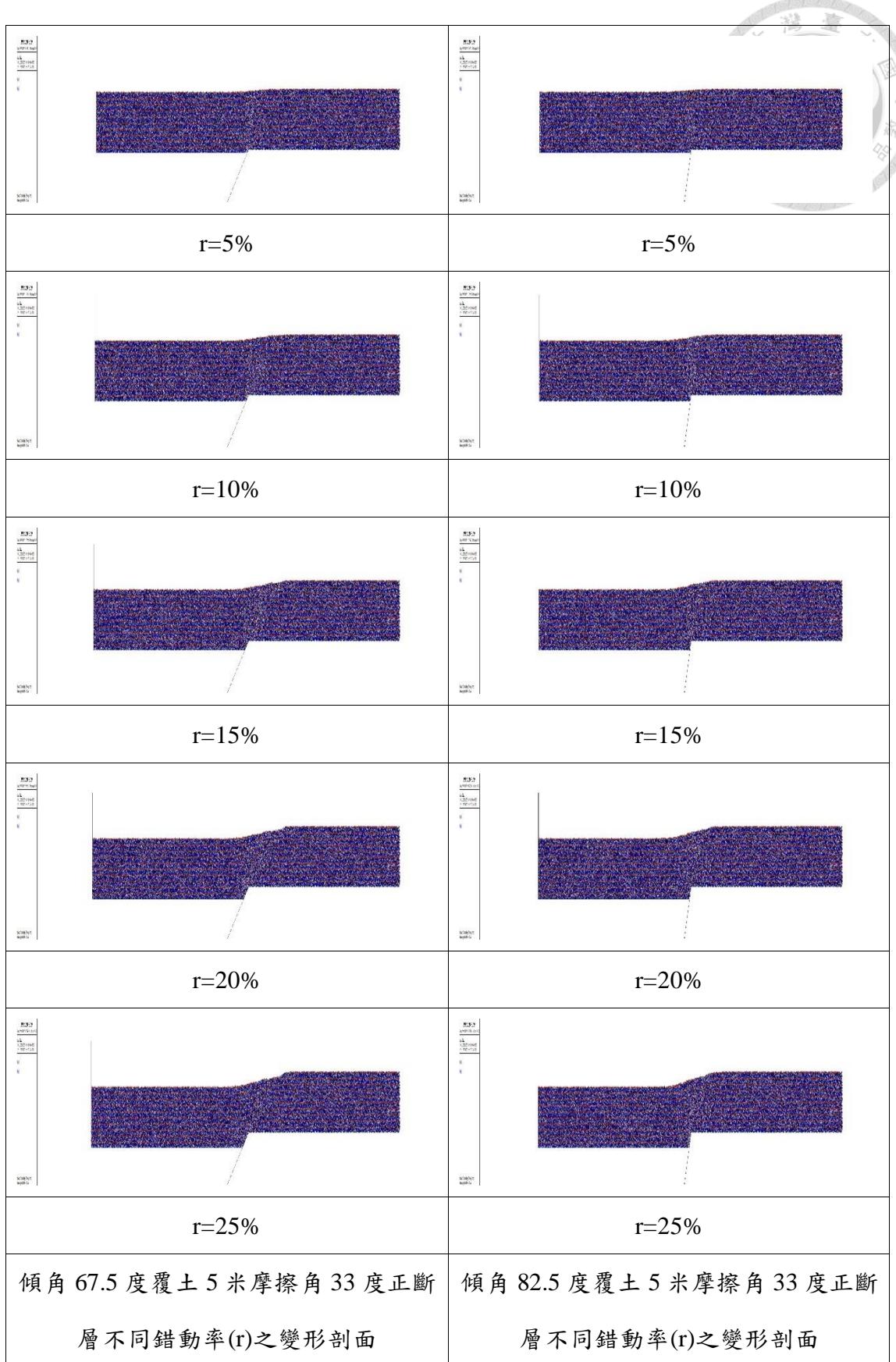
張庭傑，2014，以離心模型模擬正斷層及逆斷層通過複合土層引致的地表變形特性。  
國立中央大學土木工程學系，碩士論文。

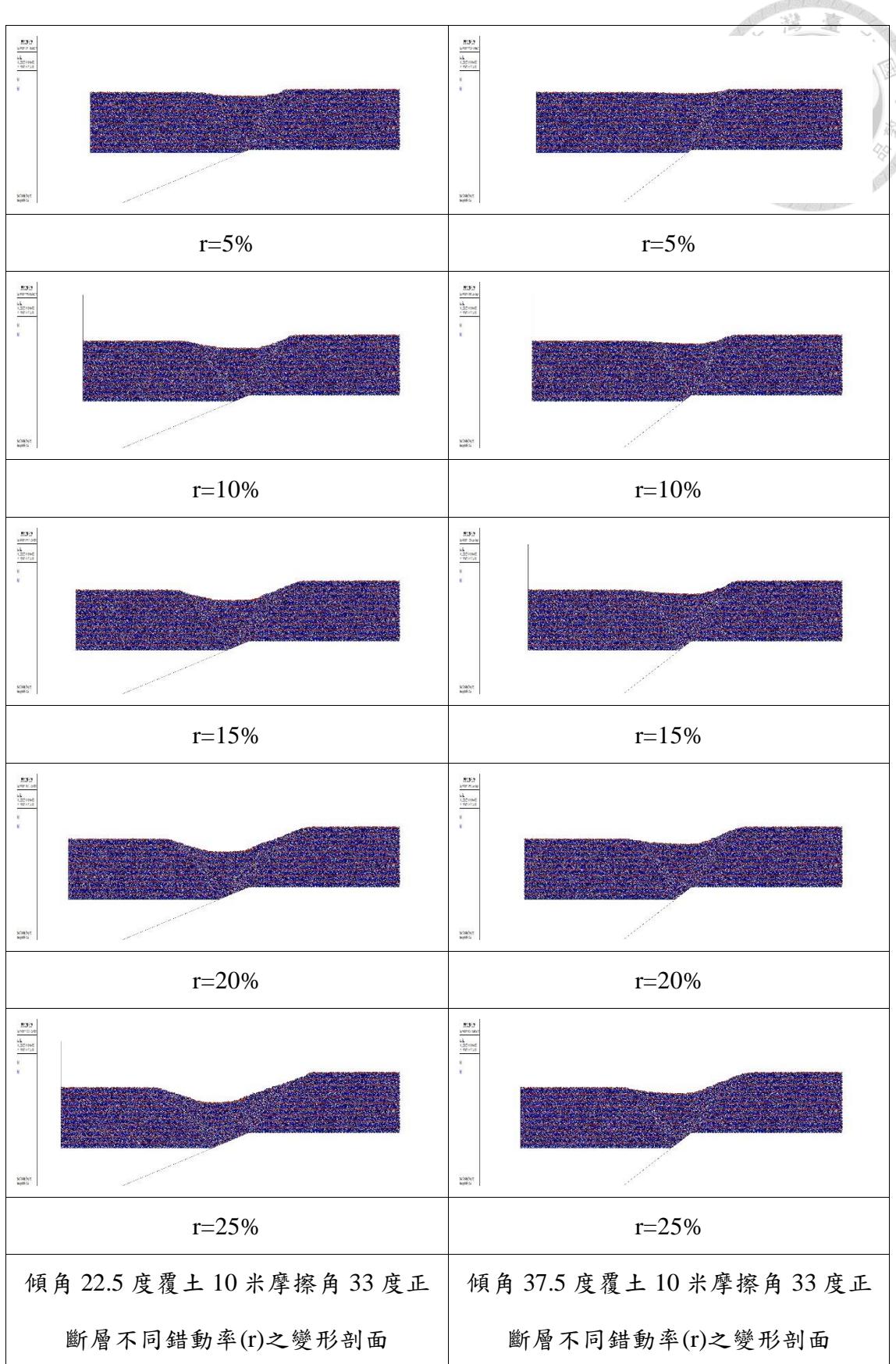


## 附錄 A 離心純砂正斷層錯動流程

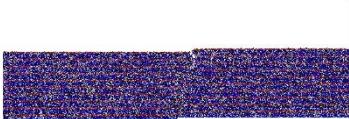
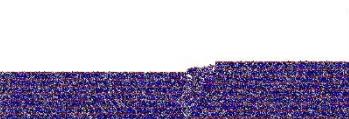
	
r=5%	r=5%
	
r=10%	r=10%
	
r=15%	r=15%
	
r=20%	r=20%
	
r=25%	r=25%
傾角 22.5 度覆土 5 米摩擦角 33 度正斷 層不同錯動率(r)之變形剖面	傾角 37.5 度覆土 5 米摩擦角 33 度正斷 層不同錯動率(r)之變形剖面







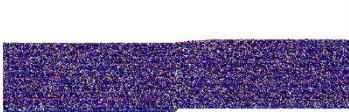
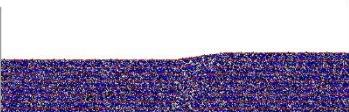
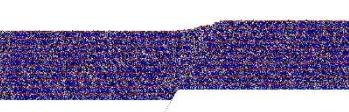
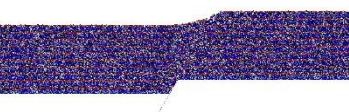
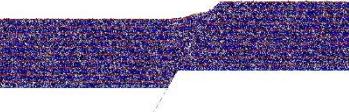
## 附錄 B 離心純黏土正斷層錯動流程

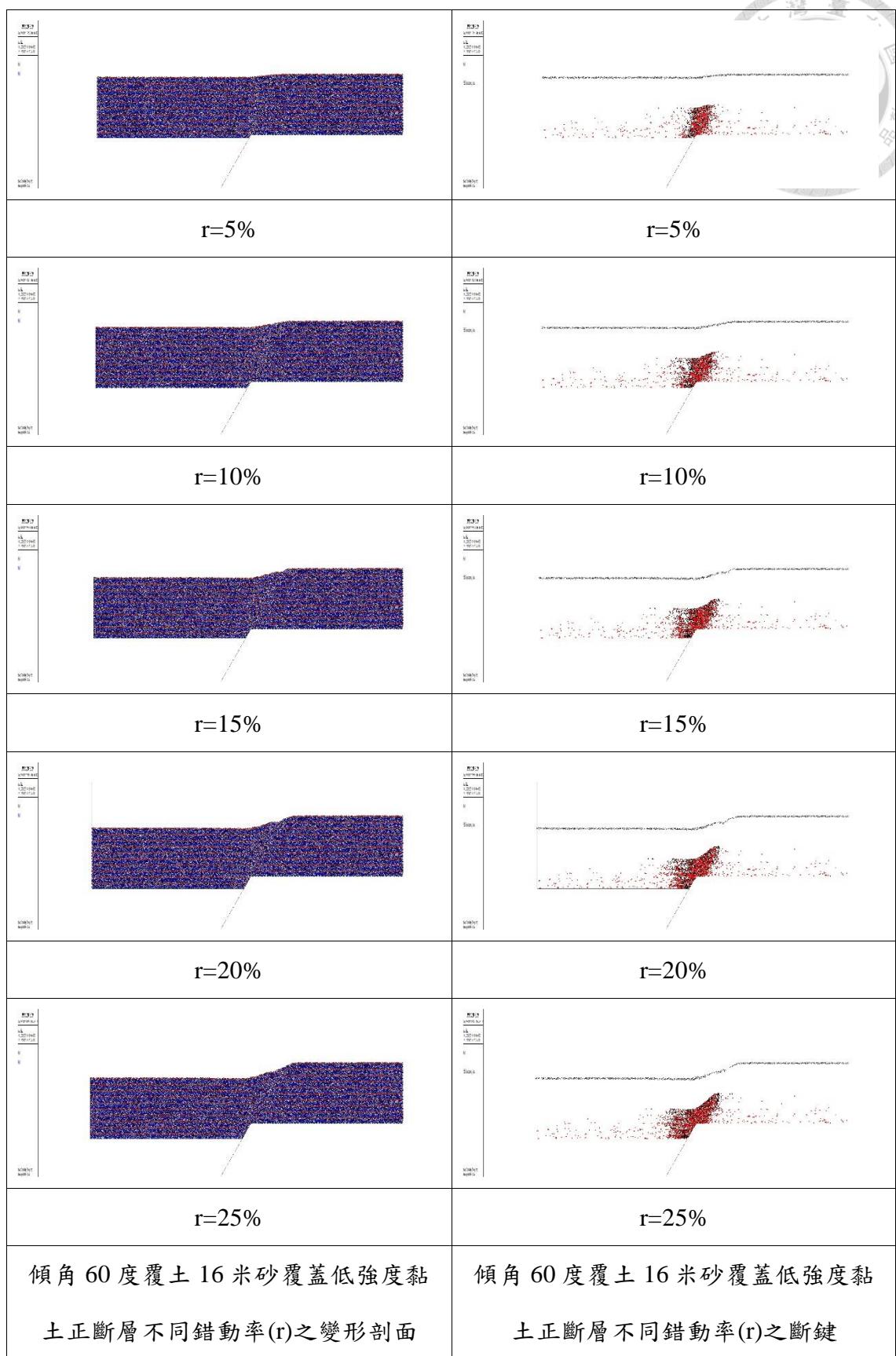
	
r=5%	r=5%
	
r=10%	r=10%
	
r=15%	r=15%
	
r=20%	r=20%
	
r=25%	r=25%
傾角 60 度覆土 16 米高強度黏土正斷 層不同錯動率(r)之變形剖面	傾角 60 度覆土 16 米高強度黏土正斷 層不同錯動率(r)之斷鍵

$r=0.4\%$	$r=0.4\%$
$r=0.8\%$	$r=0.8\%$
$r=1.2\%$	$r=1.2\%$
$r=1.6\%$	$r=1.6\%$
$r=2.0\%$	$r=2.0\%$
傾角 60 度覆土 16 米高強度黏土正斷 層小錯動率( $r$ )之變形剖面	傾角 60 度覆土 16 米高強度黏土正斷 層小錯動率( $r$ )之斷鍵

## 附錄 C 離心複合土層正斷層錯動流程



	
$r=5\%$	$r=5\%$
	
$r=10\%$	$r=10\%$
	
$r=15\%$	$r=15\%$
	
$r=20\%$	$r=20\%$
	
$r=25\%$	$r=25\%$
傾角 60 度覆土 16 米低強度黏土覆蓋 砂正斷層不同錯動率( $r$ )之變形剖面	傾角 60 度覆土 16 米低強度黏土覆蓋 砂正斷層不同錯動率( $r$ )之斷鍵



$r=0.4\%$	$r=0.4\%$
$r=0.8\%$	$r=0.8\%$
$r=1.2\%$	$r=1.2\%$
$r=1.6\%$	$r=1.6\%$
$r=2.0\%$	$r=2.0\%$
傾角 60 度覆土 16 米低強度黏土覆蓋 砂正斷層小錯動率( $r$ )之變形剖面	傾角 60 度覆土 16 米低強度黏土覆蓋 砂正斷層小錯動率( $r$ )之斷鍵

$r=0.4\%$	$r=0.4\%$
$r=0.8\%$	$r=0.8\%$
$r=1.2\%$	$r=1.2\%$
$r=1.6\%$	$r=1.6\%$
傾角 60 度覆土 16 米砂覆蓋低強度黏 土正斷層小錯動率( $r$ )之變形剖面	傾角 60 度覆土 16 米砂覆蓋低強度黏 土正斷層小錯動率( $r$ )之斷鍵

## 附錄 D 篩選邏輯門檻值之參考



表 A-1 建物受轉動產生角變量及其對應之破壞徵兆(Bjerrum,1963)

Angular distortion (Slope)	Damage or allowable criteria
1/750	Limit where difficulties with machinery sensitive to settlement are to be feared
1/600	Limit of danger for frames with diagonals
1/500	Safe limit for buildings where cracking is not permissible (safe limit for reinforced load-bearing walls)
1/300	Limit where first cracking in panel walls is to be expected; limit where difficulties with overhead cranes are to be expected
1/250	Limit where tilting of high, rigid building might become visible( danger limit for panel walls of frame building and reinforced load-bearing walls; safe limit for open steel storage and tilt of high rigid structures)
1/150	Considerable cracking in panel walls and brick walls; safe limit for flexible brick walls, with $h/L=1/4$ ; limit where structural damage of general buildings is to be feared (danger limit for open steel and reinforced concrete frames, steel storage tanks and tilt of high rigid structures; safe limit for statically determinate structures and retaining walls)
1/100	Danger limit for statically determinate structures and retaining walls

## 附錄 E 碩士學位考試口試委員提問與回覆表



編號	口試委員	提問	回覆
1.	李宏輝 教授	為何同樣的斷層模型，在錯動率逐漸增加時，搜尋到的地表影響範圍不是逐漸增廣，而是會有擴展再退縮的跳動情形？	因影響範圍的篩選邏輯為三個條件之交集，不一定是連續的表面，將所有被篩選到的顆粒，取其 X 座標最大及最小的兩顆顆粒做為邊界。篩選過程中，隨著斷層錯動率增加，原先地表的顆粒可能會滾入地表下，此時被篩選到的便會是後來出露於地表的顆粒，又顆粒粒徑縮小程度有限，地表的起伏並不是連續性的，造成篩選過程中產生歧異點，便是老師所提到的跳動情形。
2.	李宏輝 教授	請補充說明數值單壓模擬及數值巴西人法模擬的模型尺寸及顆粒粒徑。	感謝老師之指導，已於 4.1.2 節中增加說明。
3.	李宏輝 教授	請修正 contact bond 的翻譯錯誤。	感謝老師之指導，已於全文中修正。
4.	黃文昭 教授	請增加說明真實黏土材料與數值模擬之鍵結性材料	感謝老師之指導，已於 4.1.2 節中增加說明。

		之差異。	
5.	黃文昭 教授	為何選用接觸鍵結模式模擬黏土，而非平行鍵結模式？	由 2.3.1 節中之文獻回顧，得知具接觸鍵結模式之顆粒，其強度參數較接近土壤，且接觸鍵結模式只在顆粒間建立正向及切向強度，平行鍵結則是在顆粒間另外生成一基質，該基質可承受額外之彎矩，類似岩石材料中的顆粒間基質(cement)，詳細之比較已在 3.2.3 及 4.1.2 節討論。
6.	黃文昭 教授	在材料參數率定時，採用單壓強度落於一個量級及彈性模數內接近做為率定標準，為何不考慮單壓之巨觀尖峰強度相同？	本研究為進行微觀參數與巨觀參數之率定，運算大量之數值單壓模擬，結果顯示改變微觀參數之數值及量級時，並不會得到成比例且連續的巨觀參數，即只能調整微觀參數，觀察其單壓強度，並同時進行離心斷層模擬，比對產狀，選擇鍵結強度參數。
7.	黃文昭 教授	篩選影響範圍的三個條件，若分別各自搜尋顆	因為數值模擬顆粒縮小程度有限，局部兩顆顆粒的

		粒，其結果是否一致？	相relative斜率可能非常大，若只以條件 1(相鄰斜率大於 1/150)篩選，幾乎八成的地表顆粒都會被列入影響範圍，顯然相當不合理，故增加顆粒之轉角大於 1/150(條件 2)及限制顆粒垂直位移達到砂箱中的最大顆粒粒徑(條件 3)，即是確定顆粒的位移及轉動量是受到斷層錯動而引致，非問題 1 中提到的歧異點現象，故本研究中主控影響範圍的搜尋條件其實是條件 2 及條件 3，而不是只有前人文獻的地表斜率。
8.	黃文昭 教授	何為簡單韌性模式？為何模擬中不選用？	PFC 程式中，若選用接觸鍵結模式，皆預設材料為脆性破壞，顆粒間的鍵結會產生斷裂。簡單韌性模式可使材料產生韌性行為，需要額外輸入材料之正向及切向勁度、拉力強度、剪力強度、拉力強度

			等九項參數，增加微觀參數率定之困難程度，且啟用簡單韌性模型，會明顯增加運算速率約莫五至十倍以上，在效率之考量下，故本文不採用。
9.	黃文昭 教授	與物理離心機試驗比較時，為何有 $s_u$ 及 $q_u$ 兩種強度，且存在強度差異？	$s_u$ 是前人使用十字片剪測量得到的不排水剪力強度，而本研究採用李崇正老師團隊施作人工黏土單壓試驗之應力應變曲線做為數值顆粒鍵結強度率定之依據，故數值斷層砂箱的強度參數都以 $q_u$ 表示。為表示前人文獻之完整性，仍將其測量之 $s_u$ 標示於圖說中。採用單壓試驗而非十字片剪試驗，而主要是考慮現地的土壤強度參數，主要還是以單壓試驗測量，較有一致性。
10.	黃文昭 教授	在考慮 $s_u$ 隨深度改變時，如何施加鍵結強度？是否在生長地層錯動後才提高	在生長第一層生長地層時，就將其設置為預定覆土壓力下的單壓強度，主

		原地層之強度？	要是因為斷層錯動後會產生顆粒斷鍵，若在該層內重新設置強度，則會使以經斷裂的兩顆粒再次鍵結，且具有更高的強度，認為與現地土壤較不符合，故並不是在逐層增加生長地層後才提高該層之鍵結強度。
11.	黃文昭 教授	真實的黏土層在受剪動後，經過一段時間，其強度會提升，並具有潛變、韌性之行為，數值模擬的鍵結性材料並無此行為，應增列說明之。	感謝老師之指導，已於 4.1.2 節中增加說明。
12.	李崇正 教授	請修正 $s_u$ 、kPa 符號及參考文獻格式之正確性。	感謝老師之指導，已修正。
13.	李崇正 教授	請詳細說明篩選影響範圍的三個條件如何決定，是否具有物理意義？	感謝老師之指導，已於問題 7 中統一回覆。
14.	林銘郎 教授	請增列地表影響範圍之公式適用性及其迴歸公式之斜率、截距說明。	感謝老師之指導，已於第 5 章中增加說明。
15.	林銘郎	是否可將搜尋地表影範圍	感謝老師之指導，已於第 5

	教授	之邏輯應用於錯動引致的 土中變形帶寬？	章中增加說明。
--	----	------------------------	---------

