

以離心模型試驗探討正逆斷層引致的地表變形 與剪裂帶發展

洪汶宜¹ 李崇正¹ 張有毅¹ 黃文昭¹ 黃文正² 林銘郎³
林燕慧⁴

摘要

本研究利用地工離心機在 1 倍、40 倍與 80 倍地球重力的離心力場中進行試驗，並以相對密度 70% 及模型高度 200 mm 的砂層，分別模擬現場深度為 0.2 m、8 m 與 16 m 的土層，探討正斷層與逆斷層在不同抬升或下降比例時，土層地表變形與地中變形剖面的影響。從離心模型試驗結果顯示，受土壤顆粒膨脹角之影響，土層的覆土應力較小時所產生的崖坡角度較陡，若土層在較高之覆土應力環境中，崖坡的角度會較緩。正斷層試驗時，高覆土應力下的試體會引致較寬之地表剪裂帶範圍。於逆斷層試驗時，高覆土應力下的試體其地表剪裂帶範圍較窄。

關鍵詞：離心模型試驗、正斷層、逆斷層、剪裂帶

前言

對不同使用者目的或規範對象的不同，各國或不同機構對活動斷層的定義差異甚大，張徽正等（1998）有很詳細的說明，但都符合二項基本準則：過去近期曾經活動，並且可能在不久的將來再次發生錯動的斷層。活動斷層是指斷層一旦發生錯動，除了引起強烈的地震波外，亦會造成岩盤錯動、地層液化與邊坡滑動等的永久變形，這兩種機制都會對地上或地下結構物造成嚴

-
1. 中央大學土木工程系 (Department of Civil Engineering, National Central University)
 2. 中央大學應地所 (Graduate Institute of Applied Geology, National Central University)
 3. 臺灣大學土木工程系 (Department of Civil Engineering, National Taiwan University)
 4. 經濟部中央地質調查所 (Central Geological Survey, MOEA)

重損壞。1999年台灣集集地震、1999年土耳其Kocaeli地震及2008年汶川地震發生後，地震伴隨的地表變形與破裂，對結構物與設施造成嚴重損害，引起大家對此議題的注意（Lin等人，2006）。但是，有少數結構物即使位於地表破裂跡上方，結構體本身卻僅有剛體位移而並未受損，亦值得深入的探討。過去的研究對結構物受到地盤震動引致的動態反應已有相當豐富的成果（Charatpangoon等人，2014；Tubaldi等人，2014；DeAlbaAlvarez等人，2014；Damgaard等人，2014；Natarajan等人，2014；Hung等人，2014），針對斷層錯動引致之近地表變形特徵、上部覆土層之變形行為與鄰近結構物的行為等現象，相對而言則較少有深入的研究。

臺灣位在環太平洋地震帶上，是由歐亞大陸板塊和菲律賓海板塊擠壓而隆起的島嶼，由於持續至今的板塊運動，使臺灣有感地震頻繁，容易使得都會區與人口集中的市鎮發生大規模的災害，特別是沿著地表斷層線附近的區域，常伴隨嚴重的災情。集集地震後，為了避免民眾在斷層線上建築房屋而造成可能的生命財產損失，民國88年11月8日內政部營建署按照經濟部中央地質調查所之調查結果，繪製車籠埔斷層分佈圖，並劃定斷層線兩側各50公尺為暫時禁限建之範圍。從地質調查所對車籠埔斷層槽溝挖掘調查之研究結果顯示，每次大地震造成之地表破裂跡位置，是依其覆蓋在基盤之上覆土層的厚度而定，當上覆土層厚度愈厚，材料性質愈疏鬆，斷層出露地表的可能位置變動性愈大。此外，斷層作用具有重複性，而且斷層面通常並非單一的弱面，而是有多條斷層面存在，故必須特別注意斷層帶附近建築物之安全性。斷層錯動引致地表的永久變形可能會導致人民生命財產嚴重損失，因此，針對斷層跡兩側設置合宜的後退距離，是國土規劃及都市設計中相當重要的一環。

過去的研究中，Stone與Wood（1992）以地工離心機（geotechnical centrifuge）於1 g及100 g離心離場中，進行砂層中垂直正斷層（斷層傾角90度）錯動的模型試驗，其中g為地球重力場。試驗結果認為錯動面位移與砂土的顆粒尺寸的比值，會影響破裂面的型態以及斷層跡的發展；另外砂土的膨脹角及摩擦角，均會受到覆土應力大小的影響，因此，若欲以小模型的試驗結果推測現場大尺寸的行為，應該考慮這些影響因子。Moosavi等人（2010）提到，從Stone與Wood（1992）在1 g及100 g模型試驗結果顯示，在不同覆土應力情況下，垂直正斷層錯動所造成上覆土層的破裂跡型態相當類似，但受到滑動面砂土膨脹角不同的影響，1 g模型試驗沿斷層面會發生較多道的破裂面。

Tani等人(1996)進行1 g垂直斷層模型試驗，其錯動位移從50 mm到2000 mm不等，試驗結果顯示，破裂跡延伸到地表所需的底層錯動量和覆土層厚度呈現非線性的關係，覆土層厚度若少於200 mm，破裂面的數量會比較少；反之，較大型的模型其破裂型態則較為複雜。此外，本研究亦提到在1 g模型試驗中，覆土層厚度與顆粒尺寸的比值至少需大於1200以上，斷層破裂型態則漸趨一致。劉守華等人(2005)利用四種不同種類の上覆土層，分別在150 g模擬垂直正斷層以及在100 g模擬平移斷層所造成上覆土層破裂情形，模擬現場最大錯動量為3.0公尺至4.5公尺。研究成果顯示上覆土層受正斷層的影響較水平平移斷層來的大，不同種類の上覆土層破裂型態也不同。

Bransby等人(2008a及2008b)利用地工離心機，在115 g的離心加速度場中，以60度斷層傾角進行正斷層與逆斷層錯動試驗，探討乾砂土層錯動與淺基礎間的互制反應。該研究使用的斷層錯動模擬試驗箱，係以用油壓千斤頂驅動，造成斷層正向或逆向的錯動，可模擬之現場最大錯動位移為3.04公尺。試驗過程利用位移計量測地表變位，同時由壓克力視窗進行拍照，以影像處理方式評估地盤變位向量，並計算地表破裂面附近的應變場。綜合過去1 g及離心模型試驗的研究成果，影響上覆土層斷層跡發展及出露地表位置的因素，可分為斷層構造與上覆土層兩類。斷層構造的影響包括：(1)斷層種類(正斷層、逆斷層或平移斷層)；(2)斷層傾角及斷層錯位量的大小；(3)基盤頂升的速率。另外，上覆土層的影響則包括：(1)土層種類(砂土或黏土、乾砂或濕砂)及土壤性質(楊氏模數及柏松比等)；(2)土層的凝聚力、摩擦角及膨脹角的大小；(3)上覆土層厚度。除了上述諸因素外，從學理上基盤的粗糙度(roughness)、基盤的型態及上覆土層超載(surcharge)的大小，也會影響上覆土層斷層跡發展及出露地表的不同。

本研究主要目的，係藉由地工離心機及斷層錯動模擬試驗箱(fault simulation container)，進行正斷層與逆斷層錯動的離心模型試驗，希望能模擬現場斷層錯動最大達4公尺的過程，瞭解斷層活動時地表附近產生的變形特性與影響範圍，並期盼能藉由試驗結果，未來可提供數值模型做驗證，以進行更多正逆斷層相關的參數研究，提供研擬或修正地質法之子法中，有關活動斷層地質敏感區範圍劃設依據的參考。

試驗儀器與設備

離心模型試驗設備

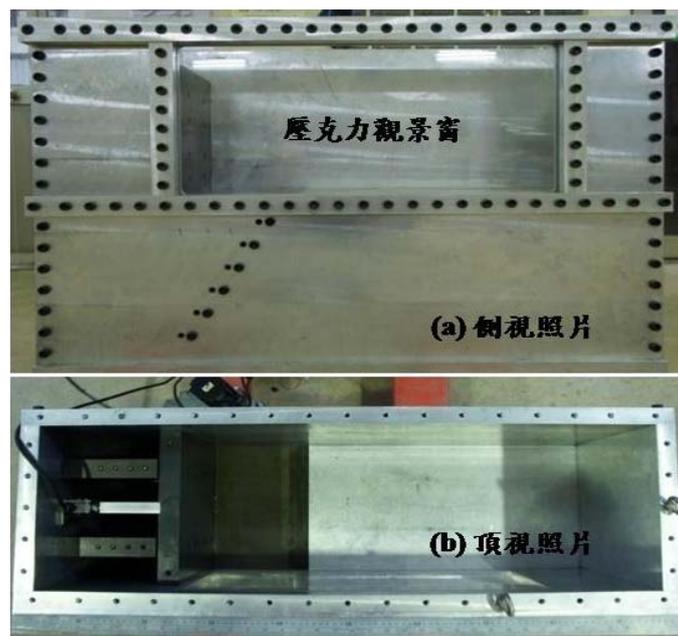
物理模型試驗（1g或離心模型）的目的，在於可以控制包括土壤性質、邊界條件及受力等試驗條件，藉由完整詳細的量測數據，探究實際現場的破壞機制及過程，進而發展數值模型或驗證分析方法的可靠性。因此，物理模型試驗的結果，可以幫助分析者更了解研究問題的力學或破壞機制(failure mechanism)，進而提出新的分析方法或概念。但因物理模型試驗有其先天之限制，若能利用數值模擬(numerical simulation)相輔相成，可以增加研究的完整性。離心模型試驗可以考慮自重效應，在高人造重力場的環境下，提供模型與原型一樣的應力應變環境，兩者之間各物理量的相似性高，是目前大地工程最常使用的研究工具。

圖一是國立中央大學土木系的地工離心機(NCU centrifuge)，其容量為100 g-ton，標稱旋轉半徑(nominal radius) 3 m，屬於中尺度的地工離心機。配合離心機掛台空間(1 m長、0.55 m寬、0.72 m高)及4 kN掛台載重的限制，本研究設計之斷層錯動模擬試驗箱如圖二所示，最大外部尺寸為1 m長、0.53 m寬、0.68 m高，試驗箱內部土壤裝盛區尺寸為 0.74 m長、0.30 m寬、0.33 m高，L型推板尺寸為長度0.15 m、寬度0.30 m、高度0.25 m，試驗箱側壁板配置0.60 m長、0.28 m寬、0.035 m厚之壓克力觀景窗，供試驗過程進行攝影觀測或試驗完成後之剖面描繪與拍照。為達到堅固與輕量化的目的，除了觀景窗以外，箱體其餘部分皆由鋁合金材料製成。斷層錯動模擬試驗箱訂製前，箱體的長側板、短側板、底板與壓克力觀景窗皆以數值軟體進行分析，瞭解箱體於80 g離心力場並受到300 mm厚砂土之土壓力時，鋁合金箱壁的最大變形量皆小於受力側板高的一百分之一，避免土壤因箱體側向變形造成土壓力的改變。

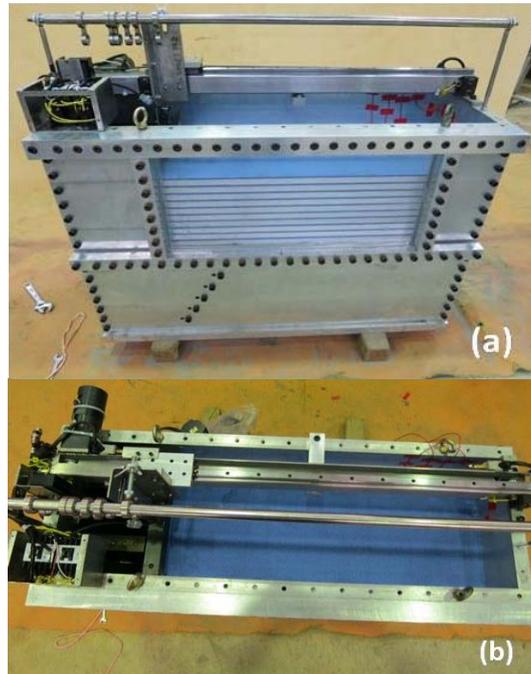
斷層錯動模擬試驗箱使用伺服馬達，可調整斷層錯動速率介於0-2.5 mm/min間，上下垂直錯動位移可達到550 mm，可模擬沿60度斷層傾角滑動的正斷層及逆斷層。為了瞭解逆斷層錯動對上部地表變形剖面之影響，試驗箱頂部安裝雷射剖面掃瞄車進行地表高程之量測，掃瞄車行速度約每秒90 mm，圖三(a)與圖三(b)分別為試體與掃瞄車安裝的側視圖與頂視圖。試體進行離心模型試驗過程中，皆以雷射掃瞄車監測L型推板之垂直位移及地層抬升過程。



圖一 中央大學土木系之地工離心機
Fig. 1 The NCU geotechnical centrifuge.



圖二 斷層錯動模擬試驗箱
Fig. 2 The fault slipping simulation model container.



圖三 試體與掃瞄車安裝(a)側視圖；(b)頂視圖

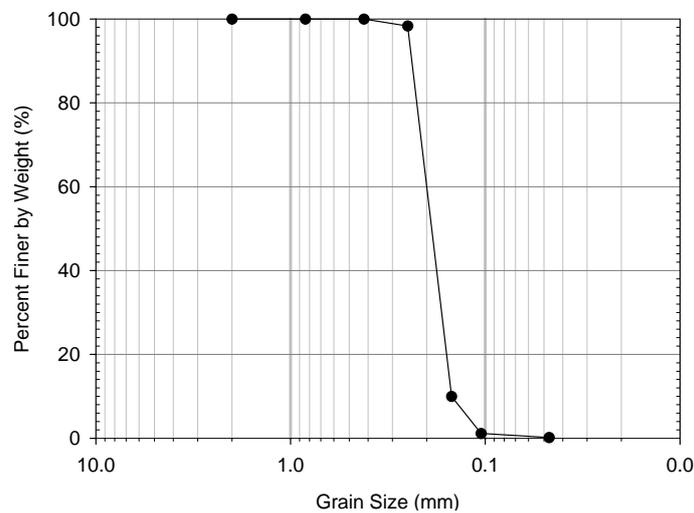
Fig. 3 The sand model and ground surface scanner: (a) side view and (b) top view.

試驗用砂與模型試體製作

試驗土壤採用白色石英細砂(粒徑分佈圖詳如圖四所示),使用前放入烘箱內烘乾 24 小時,再儲存於橡膠桶當中。石英細砂之粒徑分佈屬於不良級配 (poorly graded),通過 200 號篩僅有約 0.2%,細粒料含量極少。大部分的砂殘留於 100 號篩上重量佔約 92%、140 號篩上重量佔約 6%,砂顆粒極細且均勻,依統一土壤分類法為不良級配砂 (SP),其最大乾密度為 16.27 kN/m^3 ,最小乾密度為 13.52 kN/m^3 。於相對密度 $D_r=70\%$ 下石英砂之摩擦角約為 41 度,於 150 kPa 正向壓力下膨脹角約為 10 度,在 200 kPa 正向壓力下膨脹角約為 6 度。為了易於觀察因斷層錯動造成的土層變形與剪裂帶發展,白色石英細砂以工業酒精拌和藍色油性染劑,製成白色與藍色互層之砂土試體,由篩分析結果顯示,染色之石英細砂的粒徑分佈與未染色時並無明顯差異。

本研究以空氣霽降法 (air pluviation) 製作砂土模型試體床,小型移動式霽降儀(如圖五所示)以約 550 mm 之固定落距,準備相對密度 (D_r) 約 70% 之砂土試體。乾砂模型試體之方法步驟如下:

1. 降下震降機之盛土漏斗，並將試驗用砂土，經過 40 號篩過篩後，去除雜質並倒入漏斗內，待裝入足夠之砂土後，再將漏斗拉升至 550 mm，並使鋼管固定於二維滑動架上。
2. 將震降機組立於模型試驗箱上，固定鋼管管口至震落面之高度，此即為砂土震降高度。
3. 開啟鋼管管口進行震降，震降路徑採用 U 型迴圈路徑法，使各層之土壤表面保持平整，每層土壤的震降高度維持一定，確保試體內不同深度處砂土有一致的相對密度。
4. 每層震降砂層之厚度約為 20 mm，每完成一層砂層鋪築厚度後，即封住鋼管管口，並重新調整鋼管至固定的震降高度。
5. 砂土震落面到達預定高程時，灑入藍色色砂薄層，使斷層錯動時引致的砂土層剪裂帶易於觀測。重複步驟 3 至步驟 5，直到砂土試體達到預定的厚度。
6. 由吊秤量得試驗箱內之砂土重，確認模型整體之相對密度。
7. 將試驗箱吊至離心機掛台上，連接信號線，準備進行離心飛行，如圖六所示。待試驗結束，關閉推升馬達，並停止離心機運轉，最後將試體吊離離心機坑及拆除試體，即完成離心模型試驗。



圖四 石英砂粒徑分佈圖

Fig. 4 The particle size distribution of quartz sand.



圖五 移動式霽降儀
Fig. 5 The small travelling pluviation apparatus.



圖六 安裝試驗箱於離心機掛台
Fig. 6 Setup of the completed model on the centrifuge platform.

離心模型試驗

本研究分別以正、逆斷層各進行三組離心模型試驗，在砂土層厚度（H）為 200 mm、相對密度為 70% 的情況下，置於 1 g、40 g 與 80 g 三種環境下進行正、逆斷層錯動的模擬。在 1 g、40 g 與 80 g 三種重力場的環境中，底部垂直覆土應力（土壤單位重 $15.3 \text{ kN/m}^3 \times \text{重力值} \times \text{覆土深度 } 0.2 \text{ m}$ ）分別約為 3.1 kN/m^2 、 112.4 kN/m^2 與 224.8 kN/m^2 ，可分別模擬的現場土壓力為 0.2 m、8.0 m 與 16.0 m 厚度土層的土壓力。

試驗之目的在瞭解上覆土層厚度影響正、逆斷層的斷層跡出露地表位置及分佈範圍，以及因底部岩盤發生錯動引致的近地表變位。試驗過程中，正、逆斷層模型的垂直抬升或下降高度（h）皆為 50 mm，離心模型試體配置與試驗條件如表一所示，編號中 xx g 代表試驗之離心力、N 代表正斷層試驗、R 代表逆斷層試驗，test xx 代表試驗編號。

40 g 與 80 g 之離心模型試驗，在每加載 10 g 離心力場後由資料擷取系統讀取資料，待壓密沉陷穩定後再持續增加離心力場，直至預計之離心力場。而後，啟動斷層錯動模擬試驗箱之馬達電源，以 2 mm/min 之速度沿 60 度斜面下降或推升 L 型推板至預定高度，並於不同抬升或下降高度過程中，持續量測地表各點的

最大垂直錯動距離（dh），試驗之掃描資料，以斷層尖端為原點可繪製地表剖面變形圖。

表一 離心模型試體配置與試驗條件

Table 1. The specifications of tested models and test conditions.

試驗編號	土層厚度 H		Dr (%)	離心力場 (g)	最大抬升高度 h	
	模型 (mm)	現場 (m)			模型 (mm)	現場 (m)
80gRtest23	200	16.0	70	80	50	4.0
40gRtest21	200	8.0	70	40	50	2.0
1gRtest20	200	0.2	70	1	50	0.5
80gNtest24	200	16.0	70	80	-50	-4.0
40gNtest26	200	8.0	70	40	-50	-2.0
1gNtest31	200	0.2	70	1	-50	-0.5

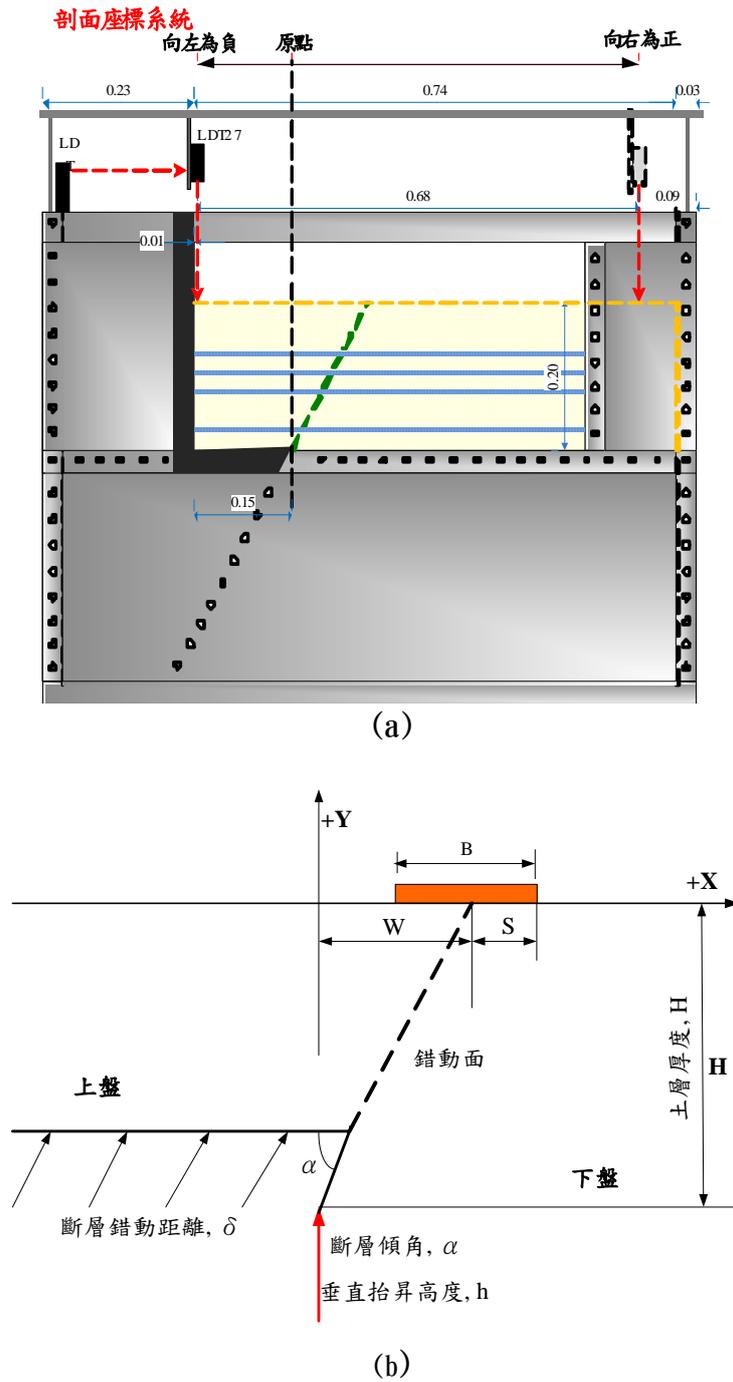
試驗結果與分析

逆斷層錯動試驗結果與討論

模擬逆斷層錯動之三組離心模型試驗的砂土層厚度（H）為200 mm，逆斷層由左側向右側（由上盤往下盤）沿60度錯動，最大垂直錯動距離（h）為50 mm。圖七為逆斷層試驗箱相關尺寸及座標原點位置示意圖，掃描資料中，原點右方為正而左方為負，向上抬升為正，向下沉陷變位為負。

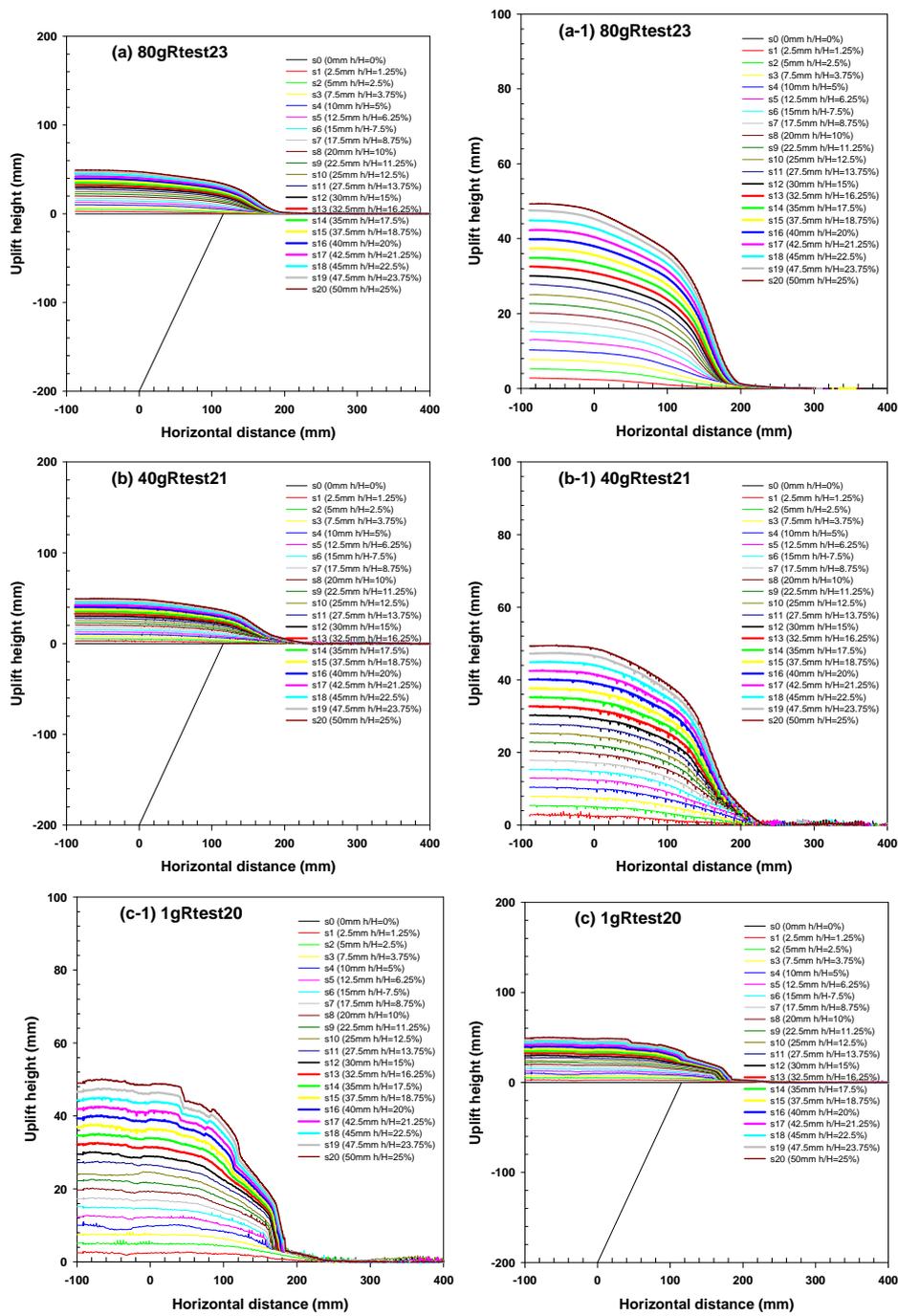
當斷層發生錯動時，垂直地表的差異變位及水平變形都是造成地表結構物損壞的主要原因，試驗80gRtest23、試驗40gRtest21與試驗1gRtest20分別模擬16 m、8 m與0.2 m土層，因底部岩盤發生逆斷層錯動引致的地表垂直變位剖面（圖八）、土層剪裂帶側視圖（圖九）、數值化之土層剪裂帶側視圖（圖十）及地表抬升之試體上視圖（圖十一）。

由圖八(a)、圖八(b)與圖八(c)中，是以斷層尖端（fault tip）尚未出露處作為為原點所描述的地表抬升曲線，可約略看出三組試驗其地表劇烈變形的範圍，都在200 mm的範圍。轉換到原型尺寸來說，意即逆斷層錯動時，若土層厚度若分別為0.2 m、8 m 與16 m時，則地表劇烈變形的影響範圍則分別為0.2 m、8 m 與16 m。因此在60度的斷層傾角的逆斷層，造成地表劇烈變形的範圍約和覆土層的厚度相當，此結論與Lin等人2006所得之結論一致。由三組試驗之側視圖可約



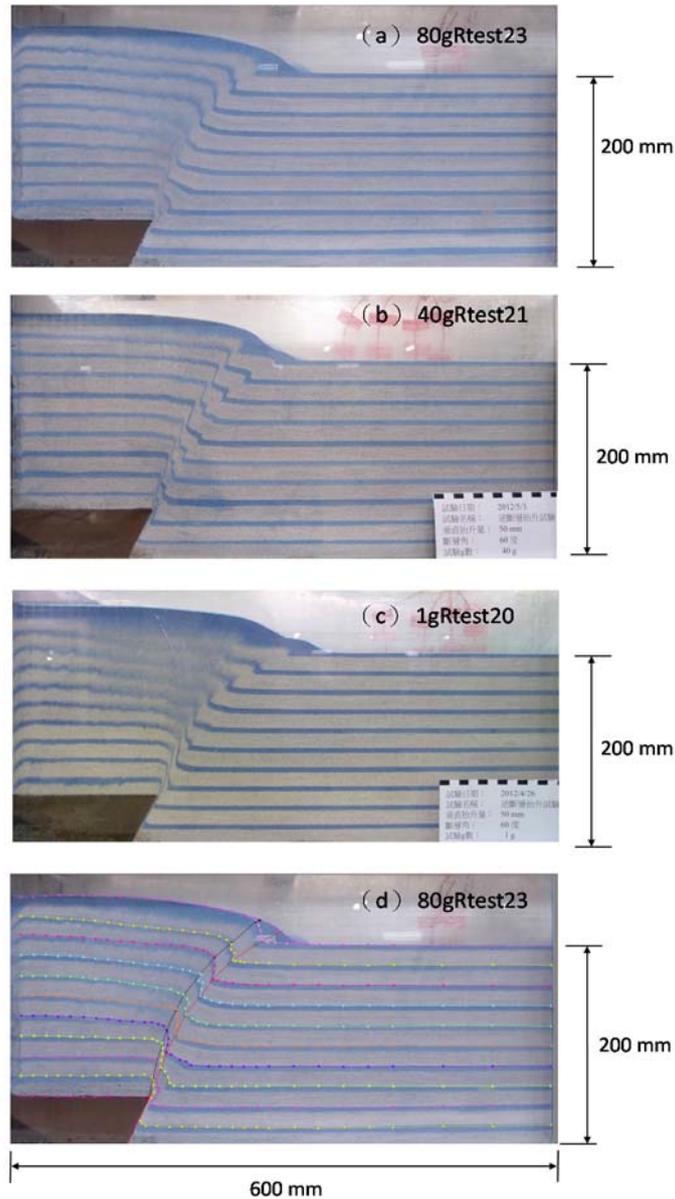
圖七 斷層模擬試驗箱雷射掃描範圍及逆斷層相關參數定義圖(a) 試驗箱相關尺寸 (單位：公尺) (b) 逆斷層座標原點示意圖

Fig. 7 Illustrations for the coordination and notations of (a) the fault slipping simulation model container and (b) the normal fault model.



圖八 土層下方岩盤不同抬升高度引致的地表變形剖面(a)試驗 80gRtest23；(b)試驗 40gRtest21；(c)試驗 1gRtest20。

Fig. 8 The profile of ground surface deformation caused by reverse fault (a) model 80gRtest23, (b) model 40gRtest21, and (c) model 1gRtest20.



圖九 土層下方岩盤抬升引致土層剪裂帶的發展側視圖(a)試驗 80gRtest23；(b)試驗 40gRtest21；(c)試驗 1gRtest20；(d)試驗 80gRtest23 影像數位化。

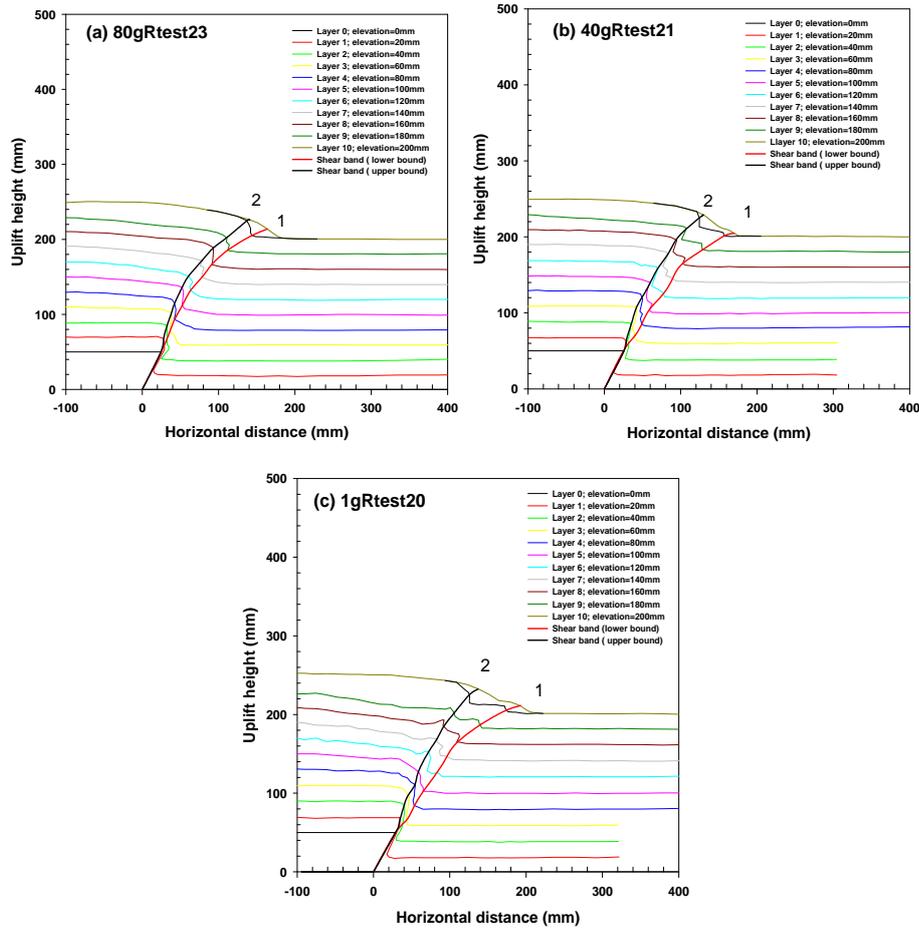
Fig. 9 The development of shear zone caused by reverse fault (a) model 80gRtest23, (b) model 40gRtest2, (c) model 1gRtest20, and (d) digitized data of model 80gRtest23.

略看出試驗 1gRtest20 具有較高的陡坡且及較不平整之地變形。其原因如下：(1) 在較低離心力場（1g）下，顆粒間所受之圍束力（confining pressure）較高離心力場力（80g）小，顆粒間具有較高之膨脹角（dilating angle）；(2) 在離心加速度

較大時，表面不平整的砂顆粒受逆斷層抬升之後，會因重力作用而滾落，使地表變形剖面較為平滑。

圖九(a)、圖九(b)與圖九(c)分別為200 mm砂土層於80 g、40 g、1 g之環境下，在基盤岩層抬升相同的垂直錯動變位時，由壓克力視窗所取得砂土層剖面最終的剪動情況，可以觀察斷層跡由岩盤破裂處向地表延伸的最終發展狀況，斷層跡之發展首先係由紅色部份之斷層跡先行發展後再發展黑色部分之斷層跡。

由圖九(d) 顯示斷層線於近基盤時斷層線角度較陡，當斷層線接近地表時其角度則變平緩。圖十(a)、圖十(b)與圖十(c)分別為圖九(a)、圖九(b)與圖九(c)之數值化圖型。圖十(a)、圖十(b)與圖十(c)中紅色及黑色實線描繪的是分別下斷層



圖十 逆斷層引致的土層剪裂帶的分布(a)試驗 80gRtest23；(b)試驗 40gRtest21；(c)試驗 1gRtest20。

Fig. 10 The distribution of shear zone caused by revers fault (a) model 80gRtest23, (b) model 40gRtest21, and (c) model 1gRtest20.

及上斷層的發展軌跡，兩條實線所包絡之範圍即為土壤之剪裂帶，剪裂帶的發展時序以阿拉伯數字表示。對逆斷層而言，靠近下盤的剪裂帶先發生（紅色實線），在錯動至一定高度後，靠近上盤的剪裂帶接續發生（黑色實線）。圖十(c)的剪裂帶範圍比圖十(b)寬，而圖十(b)的剪裂帶範圍又比圖十(a)寬，因此砂土層受基盤岩層逆推錯動時，土壤試體在高離心力場情況下會有較高的覆土應力，砂土膨脹角會受到壓抑，土層所發生之剪裂帶範圍會比較窄。試驗80gRtest23、試驗40gRtest21與試驗1gRtest20之剪裂帶的範圍分別為0.12H、0.20H及0.28H。

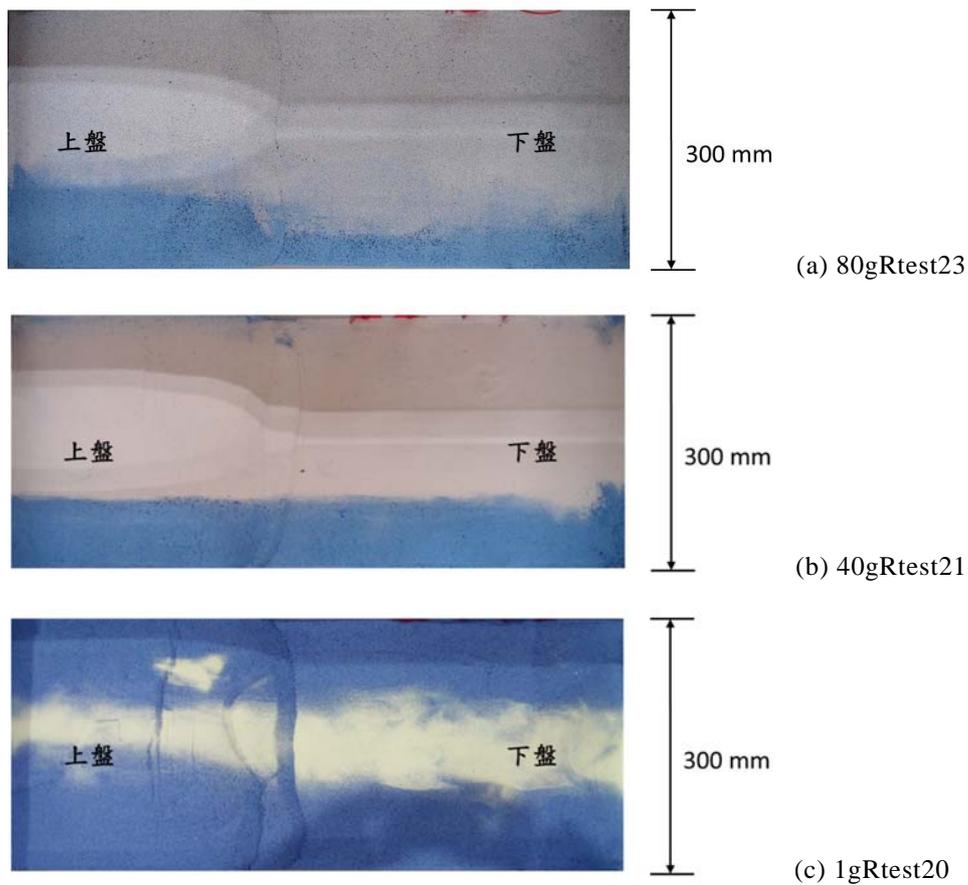
表二為試驗80gRtest23、試驗40gRtest21與試驗1gRtest20於最大垂直錯動距離（h）與土層厚度（H）比值為0.25時，斷層線與地表交界位置與斷層錯動帶寬度的比較表，其中，表中W之定義為地表斷層線與斷層尖端（fault tip）於正向投影面上之水平間距，如圖七(b)所示，W/H之比值意味著斷層錯動距離對下盤之影響，W/H比值愈大，斷層錯動距離對下盤之影響就愈大。表中顯示於較低之離心力下進行試驗得到的結果，其W/H比值較大，試驗80gRtest23、試驗40gRtest21與試驗1gRtest20之W/H比值分別為0.82、0.85及0.96。

表二、斷層線與地表交界位置與斷層錯動帶於地表上之寬度比較表

Table 2. The intersections of fault slip surfaces and ground surface caused by reverse fault.

試驗編號	Dr (%)	上斷層線與地表交界位置 (mm)	下斷層線與地表交界位置 (mm)	$\frac{W}{H}$	斷層錯動帶於地表上之寬度 (mm)
80gNtest23	70	140.87	163.88	0.82	23.01 (0.12H)
40gRtest21	70	129.92	170.34	0.85	40.42 (0.20H)
1gRtest20	70	136.91	192.60	0.96	55.69 (0.28H)

圖十一(a)、圖十一(b)與圖十一(c)分別為200 mm砂土層於80 g、40 g、1 g之環境下，由試驗箱頂部所拍到因逆斷層錯動所造成之地表變形。為便於分別土層之變形，因此於靠近壓克力觀景窗的土壤，分層鋪設藍色色砂，地表則鋪設不同範圍的色砂，測試並尋找最佳的雷射掃瞄訊號環境。由頂視圖中可以知道，不論試體所處的離心力場為何，垂直錯動距離（h）與砂土層厚度（H）比值為0.25時，地表會引致兩階抬升。但是在1 g離心力場試驗時，試驗箱邊界的影響較大，靠近試驗箱左右邊界約三分之一試體寬度的部分，與試體中央的抬升情況不一致。但當試體置於較高的離心力場中，試驗箱邊界的影響隨即降低，僅有約試體寬度的十分之一，相當接近平面應變之行為。



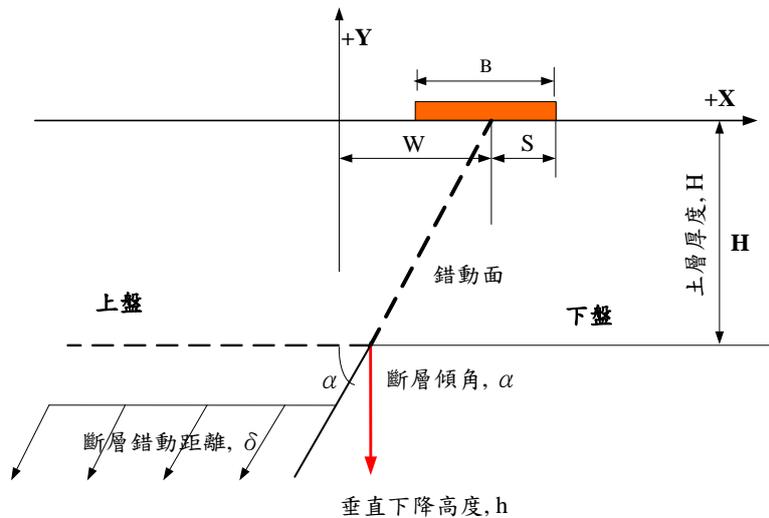
圖十一 逆斷層引致的地表抬升狀況上視圖(a)試驗 80gRtest23;(b)試驗 40gRtest21 ;
(c)試驗 1gRtest20。

Fig. 11 The top view of ground surface deformation caused by reverse fault (a) model 80gRtest23, (b) model 40gRtest21, and (c) model 1gRtest20.

正斷層錯動試驗結果與討論

模擬正斷層錯動之三組離心模型試驗的砂土層厚度 (H) 為 200 mm，正斷層由右側向左側沿 60 度錯動，最大垂直錯動距離 (h) 為 50 mm。圖十二顯示正斷層試座標原點位置示意圖，掃描資料中，原點右方為正而左方為負，向上抬升為正，向下沉陷變位為負。

利用掃描台車在砂土正斷層試體陷落過程中，每隔 2.5 mm 的垂直陷落量進行一次地表高程掃描，可以有效掌握在正斷層不同錯動量時，地表陷落的變化。圖 13 為高程掃描結果，橫座標代表水平距離，水平距離 0 處，代表斷層尖端所處初始位置；縱座標則代表地表高程，縱座標 0 代表地表陷落前之高程。圖十三(a)、



圖十二 正斷層座標原點示意圖

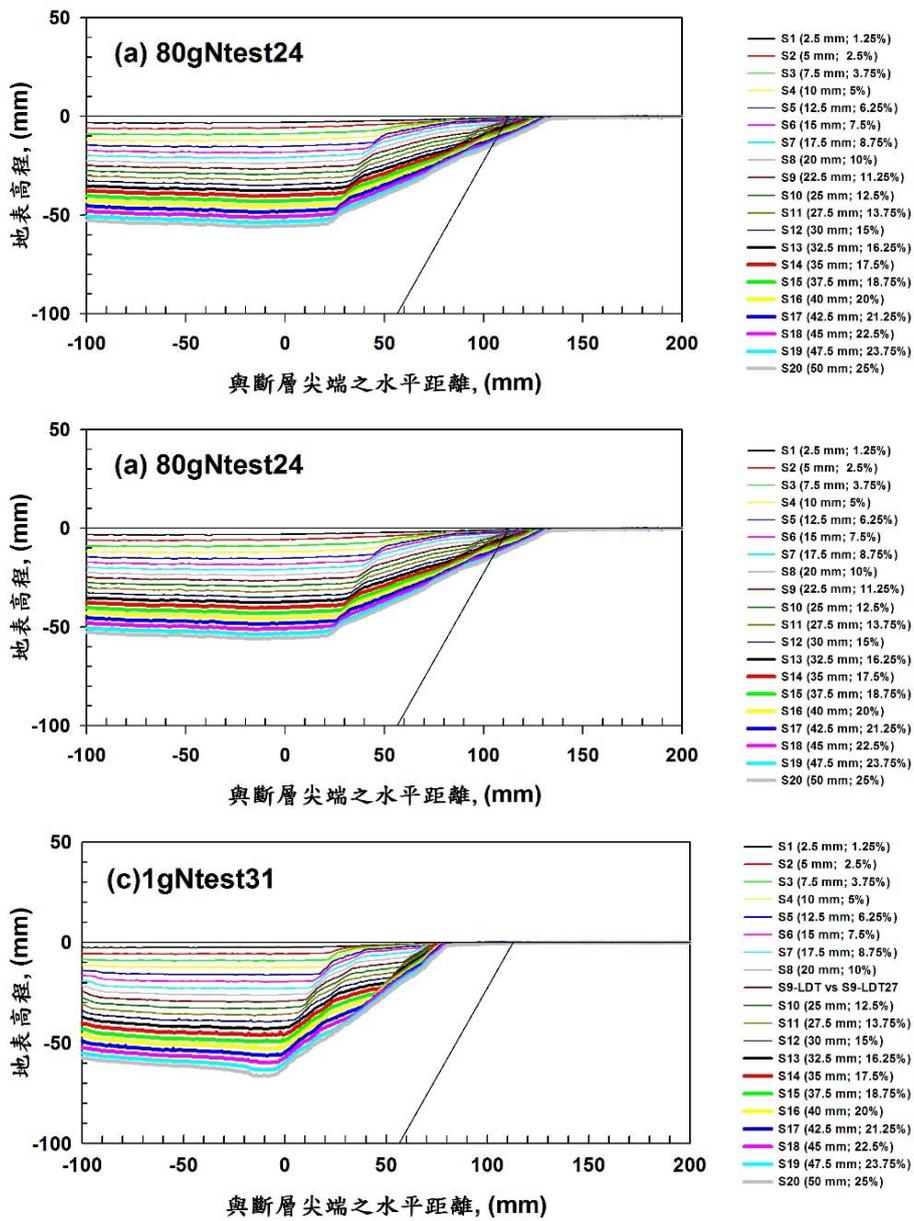
Fig. 12 Illustrations for the coordination and notations of normal fault.

十三(b)及十三(c)分別為試驗80gNtest24、試驗40gNtest26及1gNtest31在80 g、40 g與1 g之正斷層試驗。圖中顯示，隨著正斷層垂直陷落量的增加，正斷層錯動所形成的邊坡高度及邊坡角度都逐漸增加。

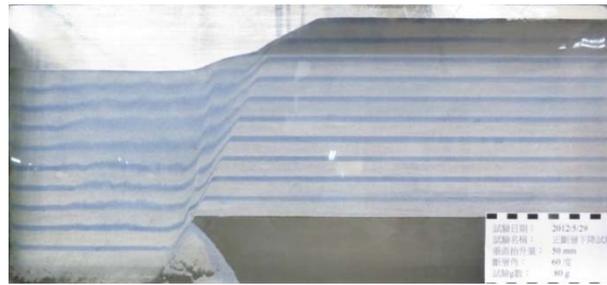
圖十四(a)、十四(b)及十四(c)為試驗80gNtest24、試驗40gNtest26及試驗1gNtest31於最大垂直陷落距離(h)與土層厚度(H)比值為0.25時，地表最後的陷落側視圖。由圖中顯示試驗1gNtest31的地盤陷落量最大，試驗40gNtest26次之，試驗80gNtest24最小。最主要的原因是1gNtest31為1 g之環境，低圍壓的砂土具有較高之膨脹角，所以土壤安息角較高，坡面不易崩坍或坡面坍塌量較少，造成地表的陷落量與坡面斜率都比較大。圖十四(d)為試驗80gNtest24影像數位化圖，圖上顯示正斷層斷層線發展至地表附近時，其角度會逐漸變陡。

圖十五為正斷層錯動引致之地表陷落面積示意圖(剖面側視圖)，圖十五(a)及圖十五(b)土黃色部份為正斷層下陷後斷層試驗箱所增加之面積(ADCC'D'A')，圖十五(c)青色部分為地表陷落之面積(ADFA')。就理論而言，斷層試驗箱所增加之面積(ADCC'D'A')需等於地表陷落之面積(ADFA')。試驗1gNtest31於1g狀態下試驗，所以其膨脹角會大於試驗80gNtest24及試驗40gNtest26，故試驗1gNtest31之坡面較陡、坡面坍塌量較少，故造成較大的地表陷落量。

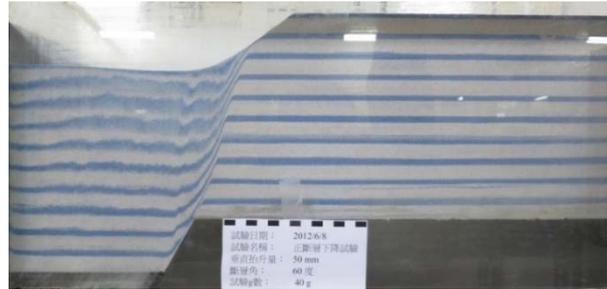
圖十六(a)、圖十六(b)與圖十六(c)分別為圖十五(a)、圖十五(b)與圖十五(c)之數位化圖型。圖十六中紅色及黑色實線描繪的分別是下斷層及上斷層的發展軌跡，兩條實線所包絡之範圍即為正斷層的剪裂帶。剪裂帶的發展時序以阿拉



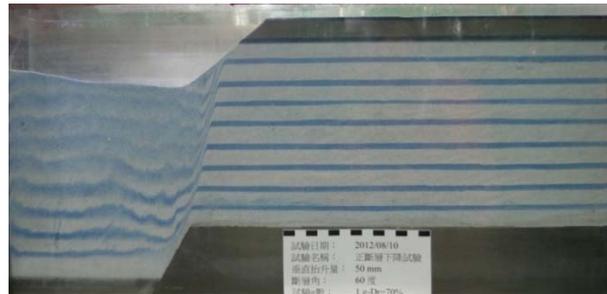
圖十三 土層下方岩盤不同下降高度引致的地表變形剖面(a)試驗 80gNtest24；(b)試驗 40gNtest26(c)試驗 1gNtest31
 Fig. 13 The profile of ground surface deformation caused by normal fault (a) model 80gNtest24, (b) model 40gNtest26, and (c) model 1gNtest31.



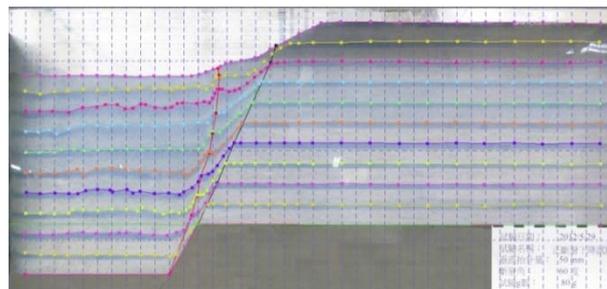
(a)試驗 80gNtest24



(b)試驗 40gNtest26



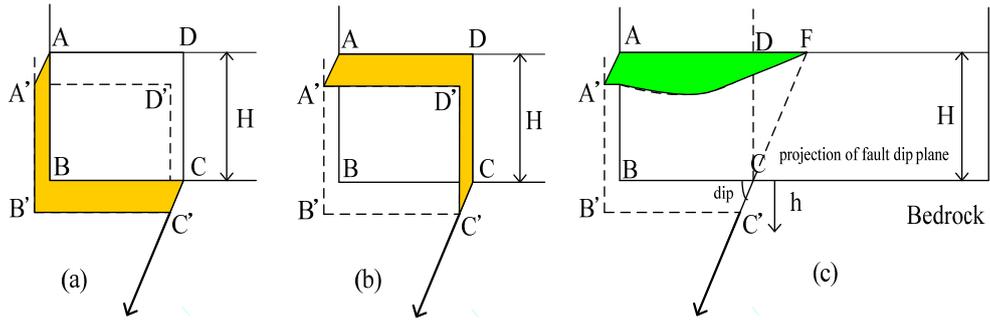
(c)試驗 1gNtest31



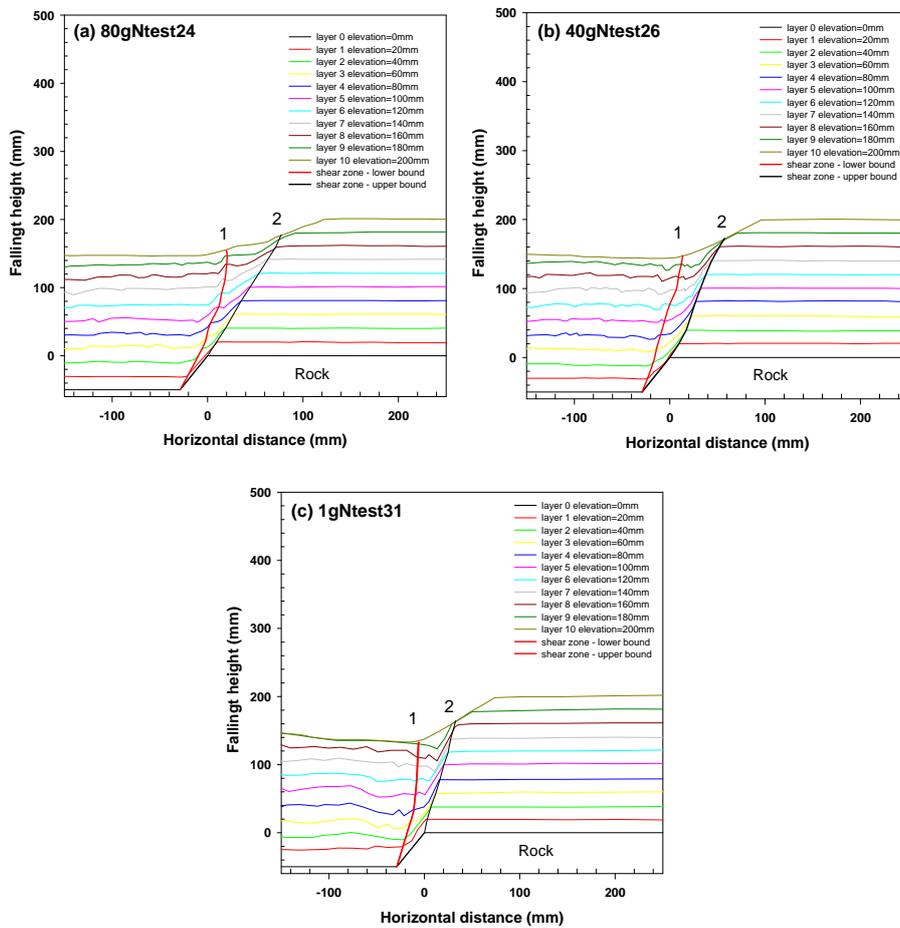
(d)試驗 80gNtest24 影像數位化

圖十四 土層下方岩盤下降引致土層剪裂帶的發展側視圖(a)試驗 80gNtest24；(b)試驗 40gNtest261；(c)試驗 1gNtest31；(d)試驗 80gNtest24 影像數位化。

Fig. 14 The development of shear zone caused by normal fault (a) model 80gNtest24, (b) model 40gNtest26, (c)model 1gNtest31, and (d) digitized data of model 80gNtest24.



圖十五 正斷層錯動引致之地表陷落面積示意圖
 Fig. 15 Illustration of ground surface settlement caused by normal fault.



圖十六 正斷層引致的土層剪裂帶的發展(a)試驗 80gNtest24; (b)試驗 40gNRtest26 ;
 (c)試驗 1gNtest31
 Fig. 16 The development of shear zone at different falling heights of the hanging wall (a) model 80gNtest24, (b) model 40gNtest26, and (c) model 1gNtest31.

伯數字表示，對正斷層而言，靠近上盤的剪裂帶先發生（紅色實線），在錯動至一定高度後，靠近下盤的剪裂帶接續發生（黑色實線）。圖十六(c)的剪裂帶範圍比圖十六(b)窄，而圖十六(b)的剪裂帶範圍又比圖十六(a)窄，因此當正斷層試體置於較高的離心力場時，土層所發生之剪裂帶範圍會比較寬，其原因是砂土膨脹角在高離心力場情況下會較小，土壤陷落時坡面較緩，故剪裂帶的範圍較寬。表三為80gNtest24、40gNtest26與1gNtest31於最大垂直錯動距離（h）與土層厚度（H）比值為0.25時，斷層線與地表交界位置與斷層錯動帶寬度比較表。試驗80gNtest24、試驗40gNtest26及試驗1gNtest31於地表的剪裂帶範圍分別為0.28H、0.20H及0.19H。表三中亦顯示，試驗80gNtest24、試驗40gNtest26及試驗1gNtest31之W/H比值分別為0.39、0.29及0.17，離心力場越小的情況下，砂質土層覆土應力較小，具有有較大之較膨脹角，坡面不易崩坍，因此試驗結果的W/H比值較小，正斷層錯動距離對下盤之影響較小。

表三、正斷層斷層線位置與斷層錯動帶於地表上之寬度比較表

Table 3 The intersections of fault slip surfaces and ground surface caused by normal fault.

試驗編號	Dr (%)	上斷層線與地表交界位置 (mm)	下斷層線與地表交界位置(mm)	$\frac{W}{H}$	斷層錯動帶於地表上之寬度 (mm)
80gNtest24	70	77.1	20.6	0.39	56.5 (0.28H)
40gNtest26	70	54.4	13.6	0.29	40.8 (0.20H)
1gNtest31	70	32.9	-5.7	0.17	38.6 (0.19H)

結論

本研究共進行6組離心模型試驗，在砂土層厚度（H）為200 mm、相對密度70%時，分別於80 g、40 g與1 g 離心力場下模擬不同覆土應力環境，並進行正斷層與逆斷層沿著60度之斷層傾角錯動，模擬不同錯動高程情況下對地表變形的影響，試驗結果略述如下：

1. 由於高覆土應力下顆粒間膨脹角較小，而低覆土應力下膨脹角較大，因此，正、逆斷層離心試驗中，試體在較小之覆土應力會產生角度較陡之崖坡。相反的，若試體在較高之覆土應力環境中，崖坡的角度會較緩。
2. 有關土層剪裂帶於地表的範圍，於正斷層試驗時，高覆土應力下的試體其

地表剪裂帶範圍較寬。於逆斷層試驗時，高覆土應力下的試體其地表剪裂帶範圍較窄。

3. 正斷層之斷層線發展至接近地表時，斷層線的角度會變陡，而逆斷層之斷層線再接近地表時則是變緩。因此，於正斷層試驗時，高覆土應力下的試體其 W/H 比值較大。於逆斷層試驗結果則相反，高覆土應力下的試體其 W/H 比值較小。

由上述的結果可以知道，正、逆斷層引致砂土地層地表變形的範圍與岩盤上方的土層厚度息息相關，覆土應力會影響膨脹角，進而影響剪裂帶的範圍及地表斷層線的位置。再者，實際的土層並非單純的砂質土壤，在黏土地層、黏土-砂互層、砂-黏土互層等不同的條件下，剪裂帶發展與地表變形影響範圍勢必不同。因此，若要較為準確的評估斷層線兩側暫時限建區域的範圍，應於斷層線附近進行地球物理探測或鑽探，瞭解土層的性質與幾何條件，進行綜合性的考量，方能評估各個不同地區的限建區範圍。

誌謝

本研究之研究經費係由經濟部中央地質調查所提供，計畫名稱「活動斷層近地表變形特性研究（1/4）」（100-5226904000-05-01）、計畫名稱「活動斷層近地表變形特性研究（2/4）」（101-5226904000-03-01），在此特表感謝。

參考文獻

- 林銘郎、李崇正、黃文昭、黃文正（2011），「活動斷層近地表變形特性研究(1/4)期末報告」，經濟部中央地質調查所研究報告，編號100-5226904000-05-01，台北。
- 張徽正、林啟文、陳勉銘、盧詩丁（1998），台灣活動斷層概論，經濟部中央地質調查所特刊第十號，第4-6頁。
- 劉守華、董津城、徐光明、蔡正銀（2005）「地下斷裂對不同土質上覆土層的工程影響」，岩石力學與工程學報，第24期，第11卷，第1868-1874頁。
- Bransby, M. F., Davies, M. C. R., and Nahas, A. El. (2008b) "Centrifuge modeling of reverse fault-foundation interaction," *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6, 607-628.
- Bransby, M. F., Davies, M. C. R., and Nahas, A. El. (2008a) "Centrifuge modeling of normal fault-foundation interaction," *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6, 585-605.

- Charatpangoon, B., Kiyono, J., Furukawa, A., and Hansapinyo, C. (2014) "Dynamic analysis of earth dam damaged by the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 64, pp. 50–62.
- DeAlbaAlvarez, R.O., Ferguson, N.S., and Mace, B.R. (2014) "A robust spot weld model for structural vibration analysis," *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 89, pp. 1–7.
- Damgaard, M., Andersen, L.V., and Ibsen, L.B. (2014) "Computationally efficient modelling of dynamic soil-structure interaction of offshore wind turbines on gravity footings," *Renewable Energy*, Vol. 68, pp. 289-603.
- Hung, W.Y., Lee, C.J., Chung, W.Y., Tsai, C.H., Chen, T., Huang, C.C., Yuan-Chieh Wu(2014) " Seismic behavior of pile in liquefiable soil ground by centrifuge shaking table tests," *Journal of Vibroengineering*, Vol. 16, Issue 2, pp. 712-720.
- 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.
- Moosavi, S. M., Jafari, M. K., Kamalian, M. and Shafiee (2010) "Experimental investigation of reverse fault rupture-rigid shallow foundation interaction," *International Journal of Civil Engineering*, 8(2), 85-98.
- Natarajan, S., Haboussi, M., and Manickam, G. (2014) "Application of higher-order structural theory to bending and free vibration analysis of sandwich plates with CNT reinforced composite facesheets," *Composite Structures*, Vol. 113, pp. 197–207.
- Stone, K. J. L. and Wood, D. M. (1992) "Effects of dilatancy and particle size observed in model tests on sand," *Soils and Foundations*, 32(4), 43-57.
- Tani, K., Ueta, K. and Onizuka, N. (1996), Discussion on "Earthquake fault rupture propagation through soil," *Journal of geotechnical engineering*, ASCE, 122(1), 80-82.
- Tubaldi, E., Tassotti, L., Dall'Asta, A., and Dezi, L. (2014) "Seismic response analysis of slender bridge piers," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 43, pp. 1503–1519.

Applying centrifuge modeling to assess ground surface deformation and the range of shear zone caused by normal and reverse faults

Wen-Yi Hung¹, Chung-Jung Lee¹, Yu-Yi Chang¹, Wen-Chao Huang¹,

Wen-Jeng Huang², Ming-Lang Lin³, Yen-Hui Lin⁴

ABSTRACT

In the study, the NCU centrifuge and the fault simulation container were used to assess the ground surface deformation and the range of shear zone caused by the normal and reverse faults. Sandy soil models with a depth of 200 mm and a relative density of approximately 70% were prepared and tested at 80 g, 40 g and at 1 g acceleration fields. Based on the test results, the slope of a cliff appears to be proportional to the dilation angle inversely proportional to the artificial acceleration field. Moreover, the dilation angle significantly affects the width of a shear zone, which tends to shrink with decreasing overburden pressure when the shear zone is triggered by a normal fault and to expand with decreasing overburden pressure if caused by a reverse fault.

Key words: centrifuge modeling, normal fault, reverse fault, shear zone

-
1. Department of Civil Engineering, National Central University
 2. Graduate Institute of Applied Geology, National Central University
 3. Department of Civil Engineering, National Taiwan University
 4. Central Geological Survey, MOEA