

A study of the deformation of surface ruptures from fault activity

林銘郎¹、李崇正²、黃文昭²、黃文正³、粘為東¹、詹佩臻¹、張有毅²、劉桓吉⁴、盧詩丁⁴、陳盈璇⁴

¹台灣大學土木工程學系、²中央大學土木工程系、³中央大學應用地質所、⁴中央地質調查所

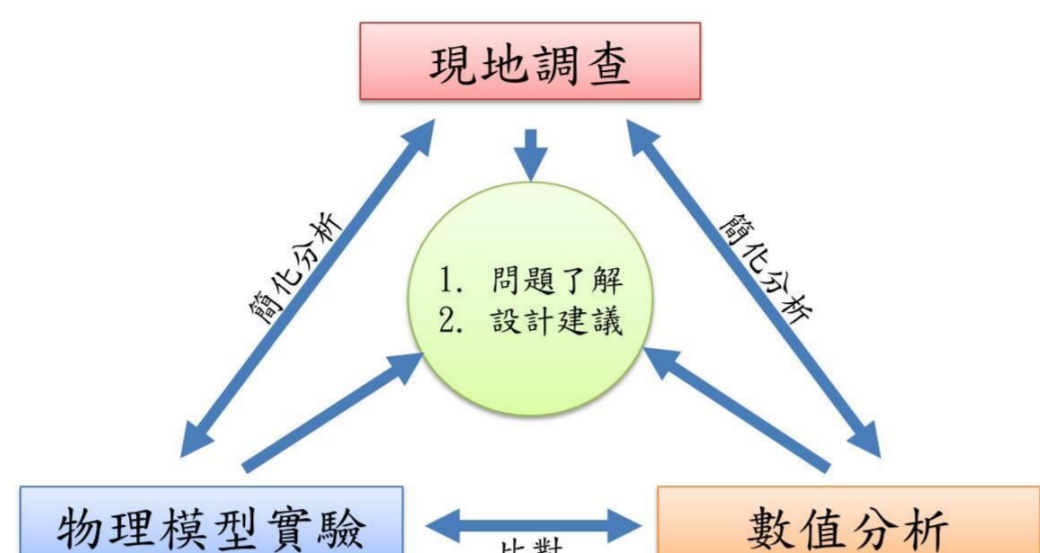
摘要

了解位於地表下的斷層尖端擴展受上覆土層對斷層跡修飾的效應，以及探討斷層作用時，隨斷層尖端擴展主要變形區內土體內應力、應變的空間分布及其對結構物之影響，學理上對斷層帶退縮距離的決定相當重要。另外加強對斷層錯動-土壤-結構互制的了解，針對直接承受斷層錯動衝擊的結構物，如何強化結構設計，盡量減少衝擊的程度也是地震減災可行的方法。目前對於活動斷層近地表變形特性的研究在研究方法大致上可以分為現地調查、物理模型試驗以及數值分析等三大類，本計畫之研究為突破單一方法學提出結果之侷限性，因此併用現地調查、物理模型實驗(離心機逆、正斷層砂箱試驗、1g橫移斷層砂箱實驗)及數值分析之方法，分別進行基本行為觀察及定量分析。

本研究計畫全程為期四年(100~103年)，今年之進程為第四年(103年)。本計畫第一年主要研究對象為逆斷層(車籠埔斷層)，第二年主要研究對象為正斷層(山腳斷層)，第三年主要研究對象為橫移斷層(米崙斷層)。在前三年的研究中，本團隊利用現地調查、槽溝資料及鑽井資料提出被選為研究對象的斷層的簡化剖面。砂箱實驗方面，前三年共進行了61組60度正、逆斷層的離心機實驗，討論的參數包括砂土的相對密度、黏土的排水剪力強度、砂黏土互層以及地表結構物的載重、寬度、與基盤破裂處的相對位置。而數值分析方面：鑑於第一年之嘗試的結果，得知非連續體體分析法的優點在於它最能模擬接近地表土層之黏土或砂土不同的變形行為，對土層中變形剪切帶發育行為較為相符，而且具有模擬斷層多次歷史活動所產生地表附近生長斷層與生長地層特性之潛力，因此後兩年研究主要以非連續體體分析法(PFC2D、3D程式)進行逆斷層、正斷層、生長斷層及橫移斷層之數值模擬。逆、正斷層的部份，透過比對離心機砂箱實驗的地表變形，本研究提出模擬砂土的微觀參數，以及可以比對斷層錯動後地表變形的數學式；生長斷層的部份，可以看出生長斷層之剪切帶會沿著既有剪切帶持續發展，並且比沒有生長斷層的正斷層更快的發展至地表，而且在五股剖面的SCF2鑽井中可以看到與數值模擬中同樣傾斜及受擾動的地層。綜合前三年的結果，本研究團隊今年之工作重點在於綜合研析前三年之研究成果，提出適合臺灣活動斷層之變形模式與影響範圍之經驗式及圖表。

前言

根據地調所2010年出版之臺灣活動斷層分布圖及地震地質與地變動潛勢分析計畫的研究成果，目前共有33條活動斷層，其中有20條是第一類活動斷層，本研究今年度之研究標的為橫移綜合研析前三年研究成果，針對三種不同之研究方法(圖1)，提出適合臺灣活動斷層之變形模式與範圍之經驗式或圖表。

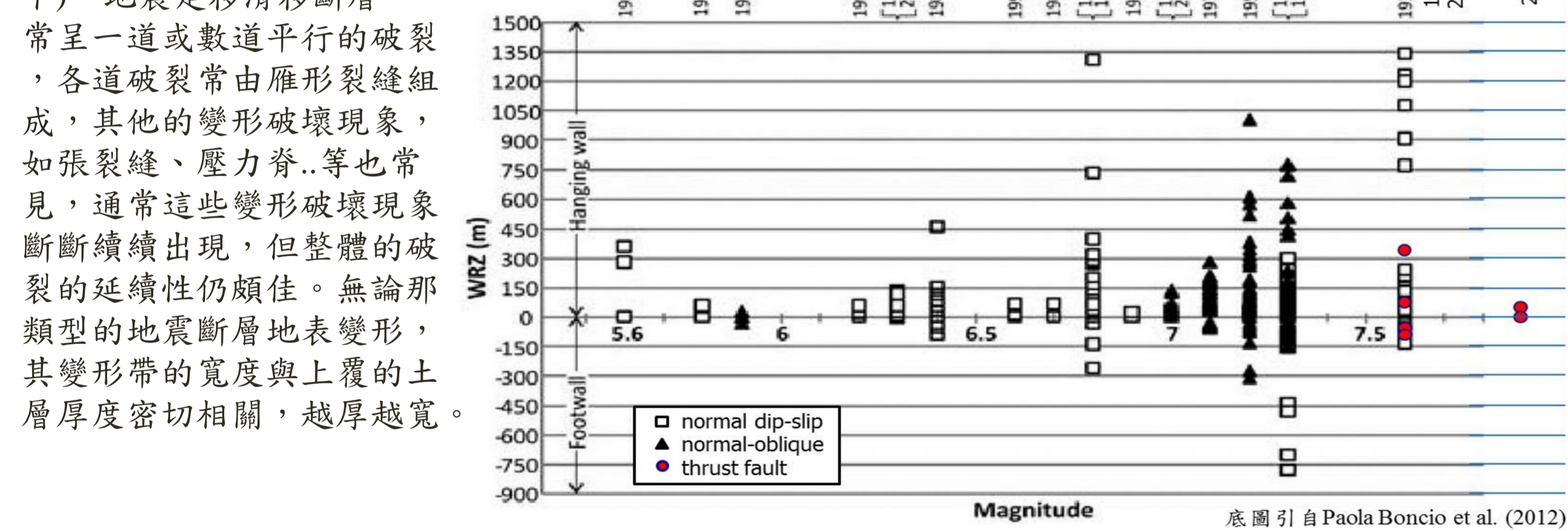


國內外斷層影響範圍文獻回顧

1999年的集集地震及同年的兩次規模七級以上的土耳其地震，讓世人對同震斷層引致地表變形的觀念，有顯著的改變。不再僅專注在地表斷層錯動量最大的斷層跡或顯著的斷層(拗曲)崖上，同時也開始記錄斷層地表兩側的次要破裂及變形情形，也開始利用較精密的測量儀器，定量化地觀察，進而判釋地震斷層錯動的影響範圍。本研究收錄了16篇發表於2001年後，有關同震地表破裂的文章，相關的地震包括最早的1997年委內瑞拉拉荷氏規模Ms6.8的地震，到2011年日本411的Hamadori地震，共計有11個地震事件，以其相關的斷層滑移特性及其引致的破壞帶或變形帶寬，分成正移斷層地震事件2起、斜移斷層地震事件6起、逆移斷層地震事件3起，收錄於表1中。

Boncio et al. (2012)即針對這次的同震地表破裂，加上18個正移斷層歷史地震事件，認定正移斷層同震破裂寬度與地震規模關係不大，透過統計資料分析，建議正移斷層地震斷層帶(Earthquake Fault Zone, EFZ)，於斷層上盤150公尺寬及於下盤30公尺寬；斷層避離帶(Fault Avoidance Zone or Setback)，於斷層上盤40公尺及下盤15公尺，參見圖4，地震強度越大，則地表影響範圍有越大的趨勢，但還是要考量地質構造，且上盤影響範圍比下盤大，需注意上下盤分界的定義。地震正滑斷層與逆滑斷層的地表變形特性“雷同”，常造成具高差的斷層崖或拗曲崖，延續頗佳，變形帶中除出現各式的破裂(如小斷層、雁形裂隙...)外，地表也呈現傾斜，或僅傾斜無破裂，變形的影響範圍，上盤總是比下盤寬許多(反向斷層不計入考量的情況下)。地震走移滑移斷層，常呈一道或數道平行的破裂，各道破裂常由雁形裂縫組成，其他的變形破壞現象，如張裂縫、壓力脊...等也常見，通常這些變形破壞現象斷斷續續出現，但整體的破裂的延續性仍頗佳。無論那類型的斷層地表變形，其變形帶的寬度與上覆的土層厚度密切相關，越厚越寬。

斷層錯動類型	相關地震	引致破壞帶或變形帶寬(公尺)	
		上盤	下盤
正滑斷層	6 April 2009 Mw 6.3 L'Aquila earthquake, Italy	170	
	11 April 2011 Mw 6.6 Hamadori earthquake, Japan	140	30
	9 July 1997 Ms 6.8 earthquake, Venezuela		5-10
走向滑移斷層	16 Oct. 1999 Hector Mine earthquake, Ca, USA	-50 (range: 10-500)	
	17 and 21 June 2000 Ms 6.6 earthquakes, Iceland	-25 (range: 2-50)	
	14 Nov. 2001 Mw 7.8 Kunlunshan earthquake, China	5-50 (range: 1-1890; max: 8,000)	2-8
	6 March 2007 Mw >6 earthquake doublet, Indonesia		2-8
	4 Sept. 2010 Mw 7.1 Darfield earthquake, New Zealand		30-300
逆滑斷層	21 Sept. 1999 Mw 7.6 Chichi earthquake, Taiwan	50-80 (range: 50-350)	42-322
	8 Oct. 2005 Mw 7.6 Kashmir earthquake, Pakistan	38.5-47.8	27.2-41.9
	12 May 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake, China	6-31	8.5-16
			1.5-5



逆正斷層離心機砂箱實驗

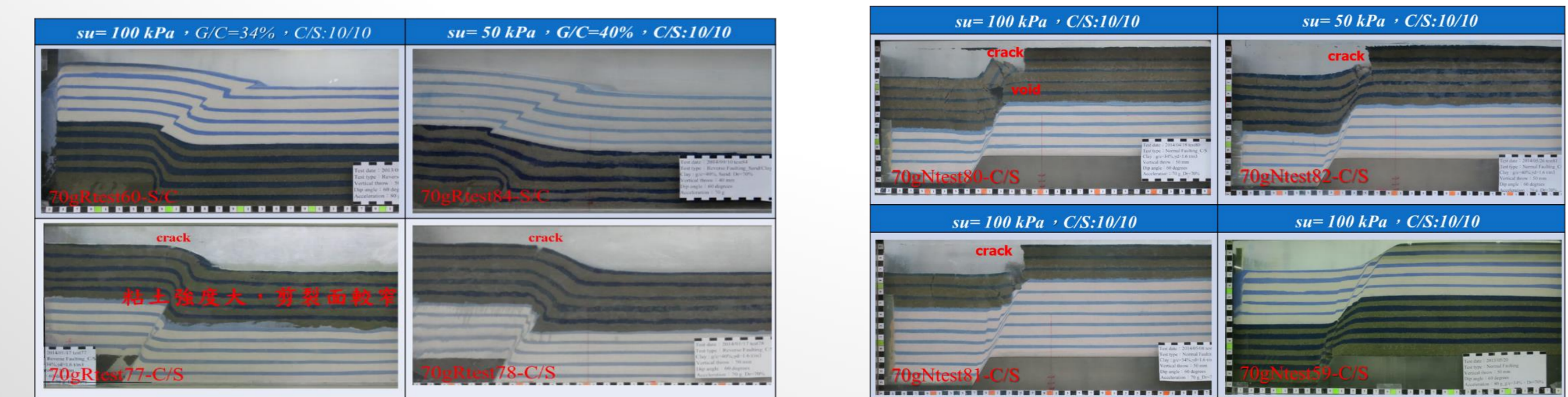
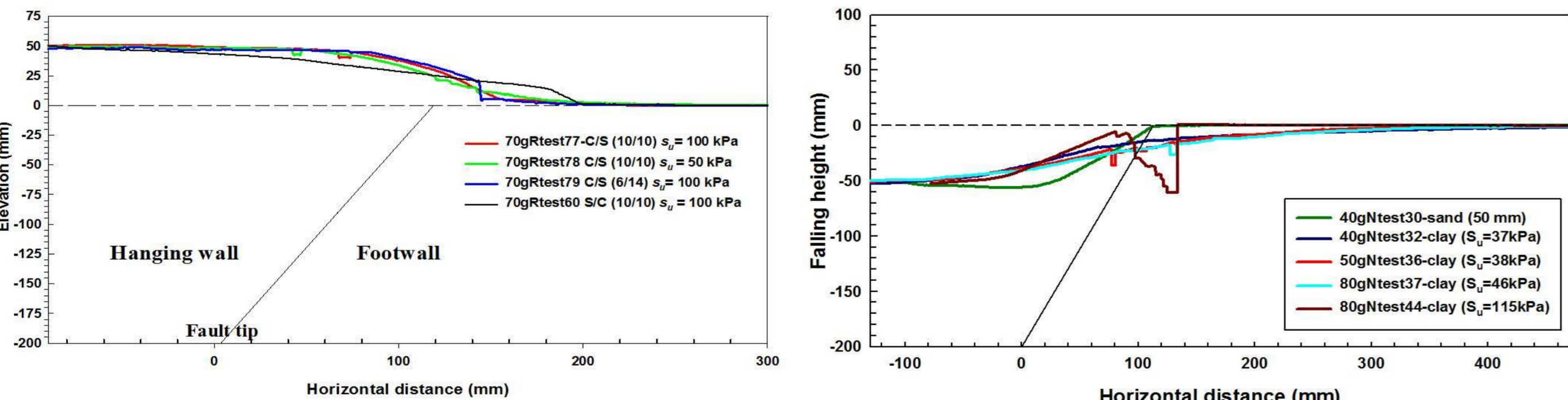
利用相似模擬來研究物理現象，藉以幫助解決理論與設計問題是工程上常用的原則，使用與原型(prototype)相同的材料且在與原型相同的應力及邊界條件下進行模型試驗，更可以反映出原型的力學行為。本研究透過傾角60度逆正斷層通過砂土層、黏土層及砂黏土互層之離心機模型試驗，以及正逆斷層與淺基礎互制及隧道互制的離心模型85組離心機試驗，傾角90度斜移斷層通過砂土層之1g模型4組試驗，觀察地下斷層跡的發展及地表變形剖面及範圍，其成果如下：

逆斷層離心機模型試驗成果

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

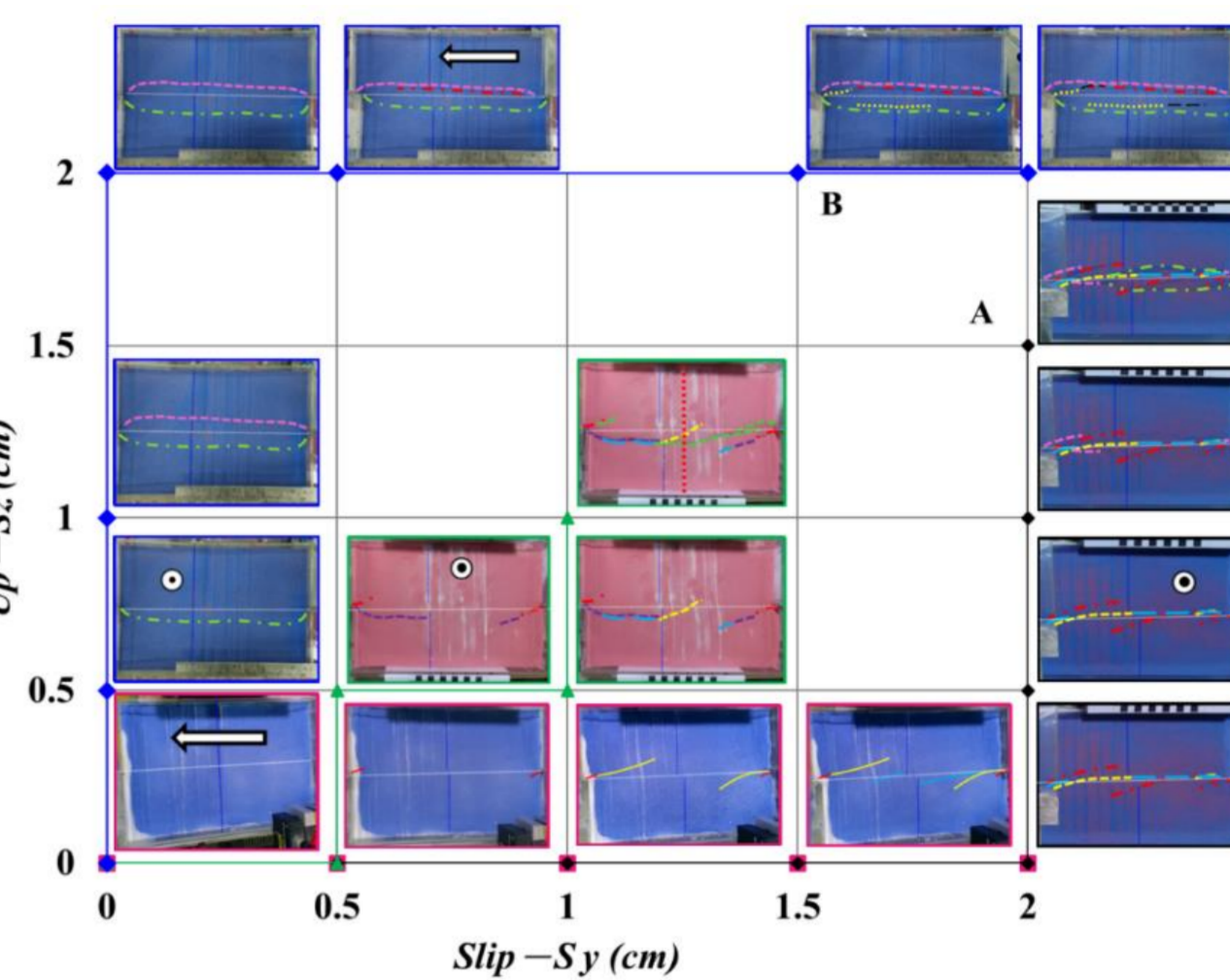
正斷層離心機模型試驗成果

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



斜移斷層砂箱實驗

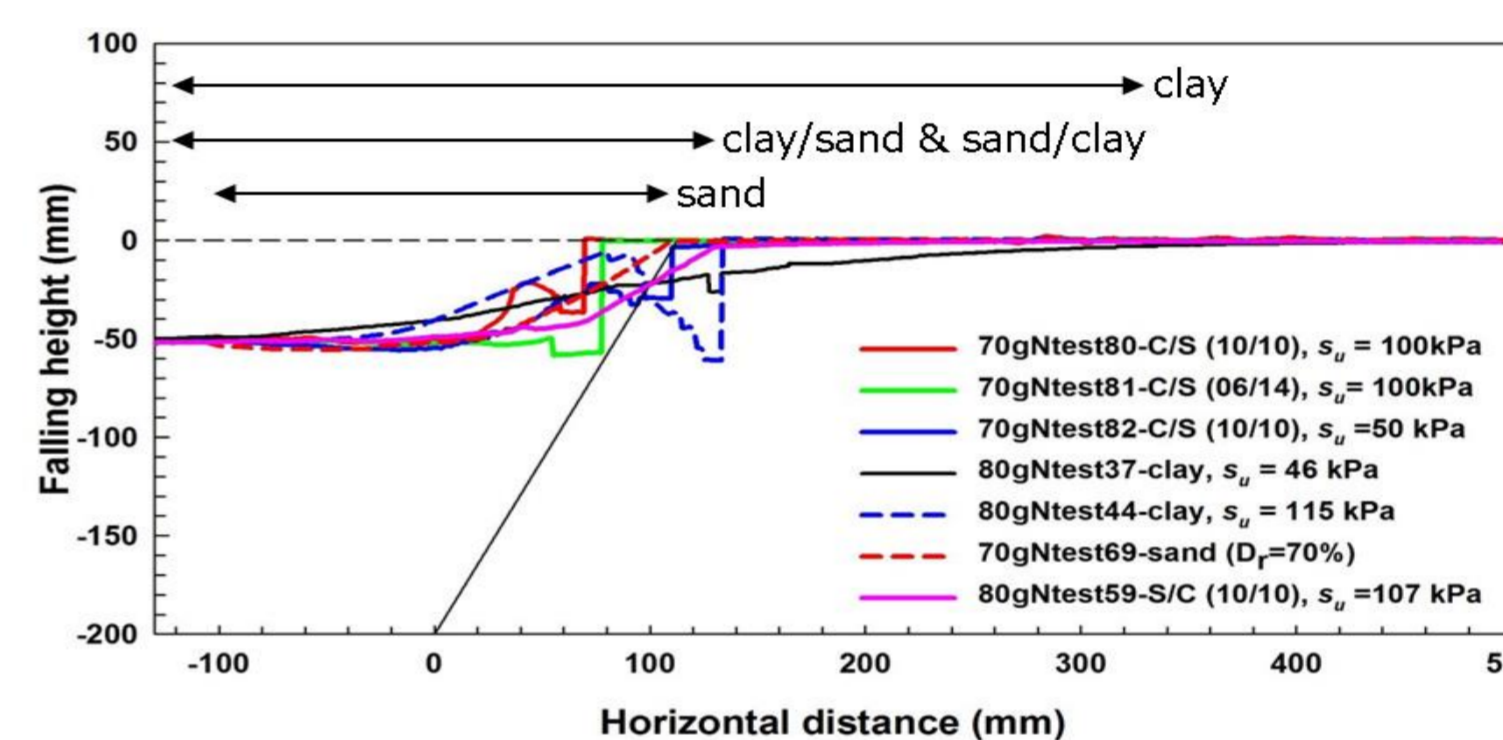
斜移斷層錯動達1cm時地表有明顯破裂跡產生，且破裂方向與雷氏剪裂相同，其後破裂跡發育趨向平行斷層面，且貫穿砂盒；抬升作用也達到1cm，地表高程差異顯著時，抬升側發生圓弧狀破裂跡，且砂顆粒由抬升側滑移至未抬升側(圖9)。透過試驗可觀察，地表因斷層作用之破裂跡影響範圍，在錯動初期範圍最廣，錯動後期影響範圍並未擴張而是在既有影響範圍內產生新破裂跡。滑移量(Sy)與地表影響範圍(W)分別對覆土層厚度(H)正規化，含有一趨勢，當Sy/H在接近1前有一高峰值，影響範圍W/H最大達到2.7，而主要影響範圍接落在1.5倍覆土層厚度以內。



砂箱實驗求取斷層地表影響範圍

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

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



數值模擬求取逆正斷層影響範圍

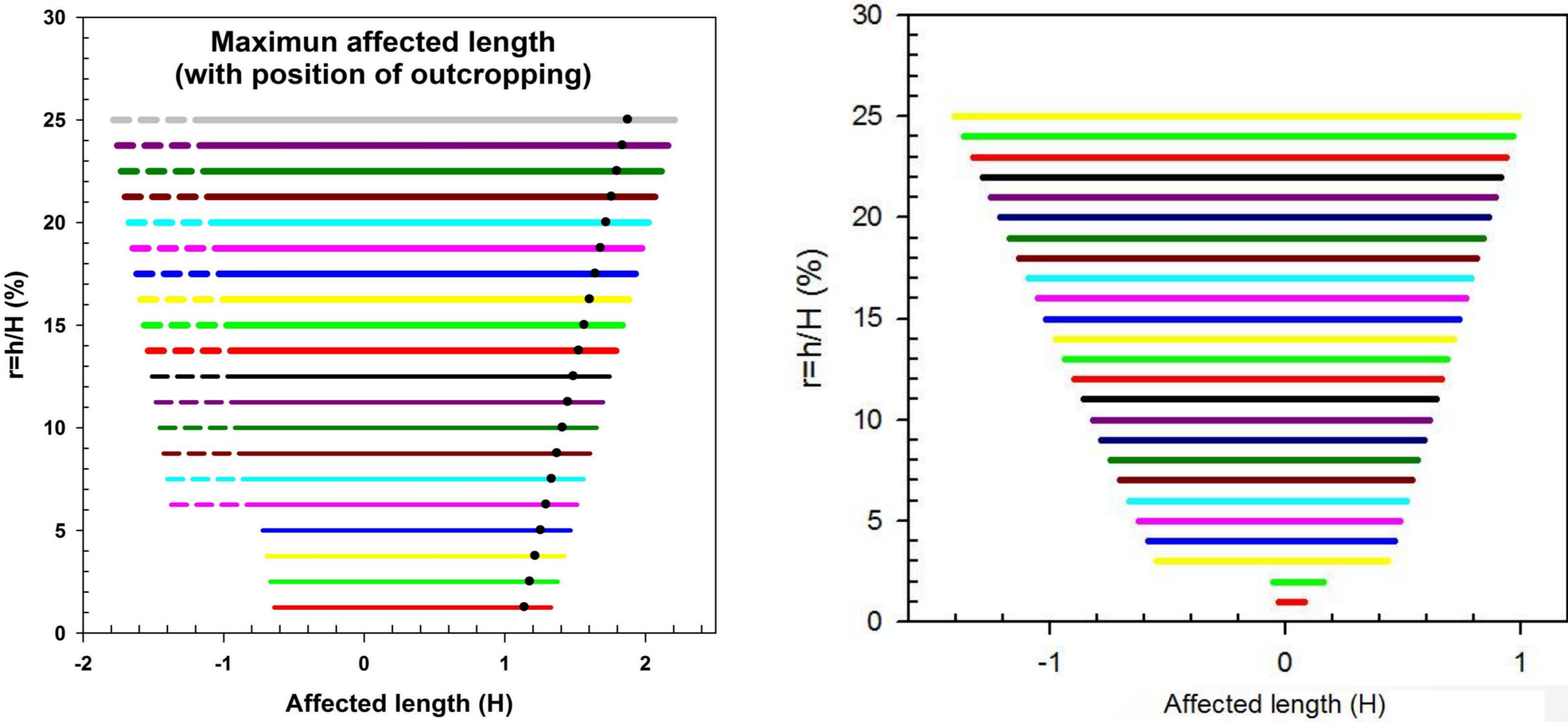
利用PFC2D模擬不同傾角及不同覆土層強度的逆正斷層錯動，其參數如表3及表4所示，觀察地下斷層跡的發展及地表變形剖面及範圍。綜合研析離心機模型試驗資料及數值模擬的結果，提出在此範圍內的地表變形剖面的斜率超過1/150，可能會造成結構物的損害，適合活動斷層之地表變形範圍的經驗公式如下，圖表如圖5，注意橫軸0的位置代表覆土之下基盤破裂的位置，與一般現地調查所看到之斷層層的位置不同，斷層層的位置以X_{outcropping}表示。

逆斷層影響範圍預估公式：在不同之斷層傾角及不同基盤垂直錯動對土層厚度(H)之正規化比值r下，x₁及x₂之最大影響範圍包絡線。其包絡回歸方程是分別為：

當斷層傾角小於等於37.5°時，r<0
上盤影響範圍為：x_{1m} = -1.133 - 0.026r、下盤影響範圍為：x₂ = 1.282 + 0.037r、出露點位置為：X_{outcropping} = 1.102 + 0.031r
當斷層傾角大於37.5°時，r>0
上盤影響範圍為：x₁ = -0.612 - 0.022r、下盤影響範圍為：x₂ = 1.282 + 0.037r、出露點位置為：X_{outcropping} = 1.102 + 0.031r
正斷層影響範圍預估公式：在不同之斷層傾角及不同基盤垂直錯動對土層厚度(H)之正規化比值r下，所有對應的斷層影響範圍邊界x₁及x₂，即最大影響範圍包絡線，其包絡回歸方程是分別為：
當0<r<3%時
上盤影響範圍為：x₁ = -0.02 - 0.025r、下盤影響範圍為：x₂ = 0.01 + 0.08r
當r>3%時
上盤影響範圍為：x₁ = -0.232 - 0.039r、下盤影響範圍為：x₂ = 0.198 + 0.029r

斷層傾角	22.5°、30°、37.5°、45°、52.5°、60°、67.5°、75°、82.5°、90°
土層厚度	15m
砂土摩擦角	30°、33°、36°、40°

斷層傾角	22.5°、30°、37.5°、45°、52.5°、60°、67.5°、75°、82.5°、90°
土層厚度	5m、10m、15m
砂土摩擦角	33°、35°、36°、40°、41°、47°、52°、60°



結論

本研究透過文獻回顧、砂箱實驗及數值模擬，分別舉出斷層引致之地表變形影響範圍，以文獻回顧的結果可以看到真實世界中斷層造成的地表變形範圍，以這些歷史記錄而言，影響範圍從數公尺到數千公尺都有，但因為其定義為影響範圍之條件各自不同，並且文獻中多未探討到覆土層厚度的現地資料，因此無法與砂箱實驗及數值模擬之結果做比對。因此，本研究以砂箱實驗及數值模擬所得之多組結果，皆以影響範圍最大之結果來提出建議，以逆正斷層而言，砂土材質下之影響範圍大約剛好等於覆土厚度，而黏土材質下之影響範圍則約為2倍的覆土厚度，橫移斷層的部份，砂土的情況下約為1.5倍覆土厚度。並且，本研究也利用數值模擬，提出隨著斷層錯動量而產生的地表影響範圍公式，此一公式也是綜合280組之砂土顆粒的模擬結果(逆40組、正240組)而取出來之最大地表影響範圍，即包含了各種斷層傾角、土層厚度及砂土摩擦角。此一結果將有助於未來研究在調查斷層地表影響範圍及訂定相關法規時的參考。