

摘要

由於斷層活動時引發地表的破壞、變形行為及變形範圍與斷層類型、傾角及兩側岩層特性、厚度有密切的關係，透過分析本所既有成果（槽溝開挖、地質鑽探、地球物理探勘、地殼變形觀測等）與鄰近地區之工程地質鑽探資料，配合現地鑽探試驗所蒐集的地表岩層特性、力學性質等資料，可以推求各斷層近地表的變形特性、分析變形之主控因子與相關參數，及結構物因應減災之方式，以達成下列目的：

1. 探討斷層兩側覆土層變形行為(包含剪切帶發展、遷移及影響參數等)
2. 斷層錯移在近地表可能影響範圍。
3. 提出較合理的安全性探討指標，作為判斷建築物或設施安全性的參考。
4. 提供重要公共工程規劃與營運風險之參考。

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，三者之功用、目的與相互間之關係，如圖 1 所示。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 斜移斷層砂箱實驗)及數值分析之方法，分別進行基本行為觀察及定量分析。

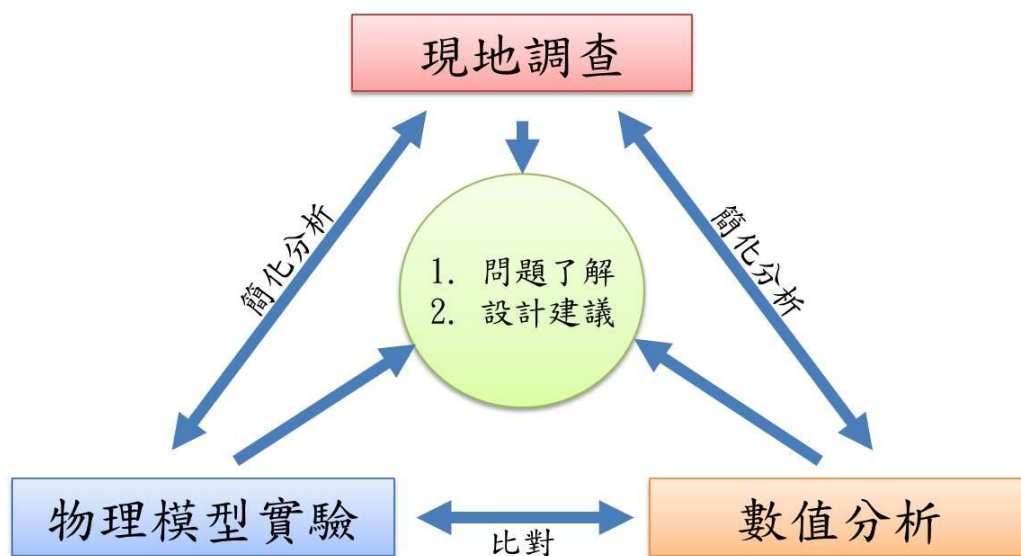


圖 1 三種研究方法間之整合關係

1. 現地調查與文獻回顧

(1) 斷層兩側覆土層之變形行為

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(撓曲)崖上，同時也開始記錄斷層地表跡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 年委內瑞拉芮氏規模 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。

表 1 歷史地震同震地表破裂

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
走向滑移斷層	9 July 1997 Ms 6.8 earthquake, Venezuela	5-10	
	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 Mw7.8 Kunlunshan earthquake, China	5-50 (range: 1-1,890; max: 8,000)	
	6 March 2007 M >6 earthquake doublet, Indonesia	2-8	
	4 Sept. 2010 Mw7.1 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	8-28
	8 Oct. 2005 Mw 7.6 Kashmir earthquake, Pakistan	38.5-47.8	
		27.2-41.9	5.9-11.3
	12 May 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake, China	6-31	
		8.5-16	1.5-5

以台灣 1999 年 9 月 21 日發生於中部的集集地震為例，地震矩規模 $M_w = 7.6$ ，造成地表破裂長約 100 公里，包括南段大致上呈南北走向的 80 公里及北段呈東北東走向約 20 公里的破裂。南段的地表破裂在大部份區域以變形帶(deformation zone)形式出現，變形帶的西側為一高差顯著的地震斷層崖或撓曲崖(圖 2)，此地形崖通常為此次地震斷層切出地表或下伏的位置，若以其為依據變形帶的寬度極不對稱，上盤的變形帶寬遠大下盤，北段也有類似的現象，若整體的構造形式更顯複雜些。根據目前收集到的精細大比例尺的地震變形帶圖(e.g. [Kelson et al., 2001](#); [Huang and Johnson, 2010](#))，推估地表破裂帶寬約 50~350 公尺，上盤變形帶寬約 42~322 公尺，下盤約 8~28 公尺，參見圖 3。

斷層崖



褶皺崖



圖 2 集集地震變形帶之地形起伏形貌

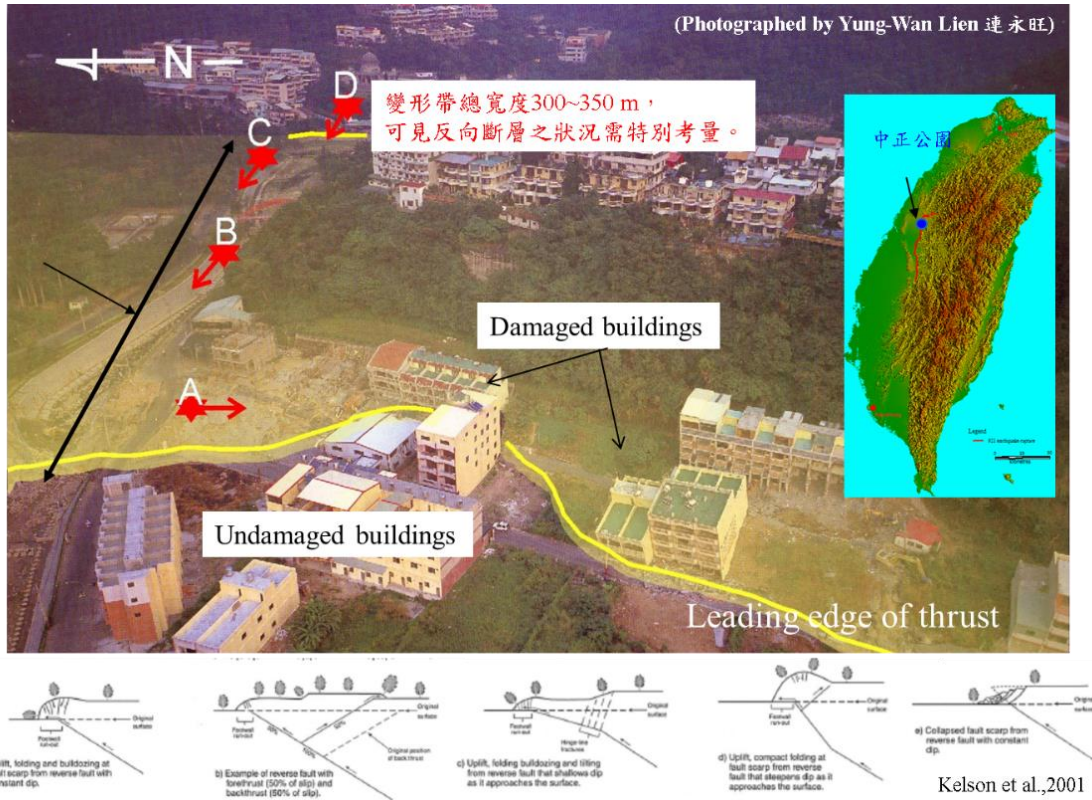


圖 3 集集地震之推估地表破裂帶寬

(2) 斷層兩側覆土層之地表影響範圍

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撓曲崖，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。無論那類型的地震斷層地表變形，其變形帶的寬度與上覆的土層厚度密切相關，越厚越寬。

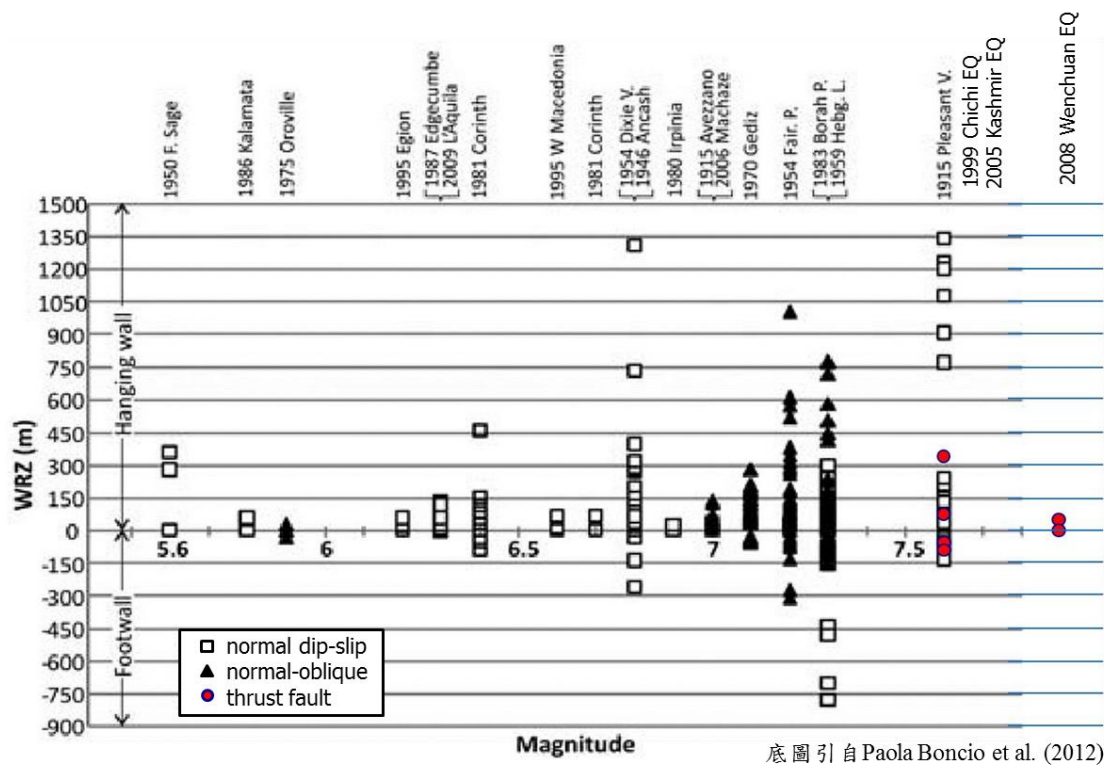


圖 4 歷史地震同震地表破裂範圍

2. 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 度正逆斷層通過砂土層、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：

A. 逆斷層離心模型試驗成果

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)。

B. 正斷層離心模型試驗成果

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點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)。

C. 斜移斷層 1g 模型試驗成果

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(S_y)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 S_y/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。

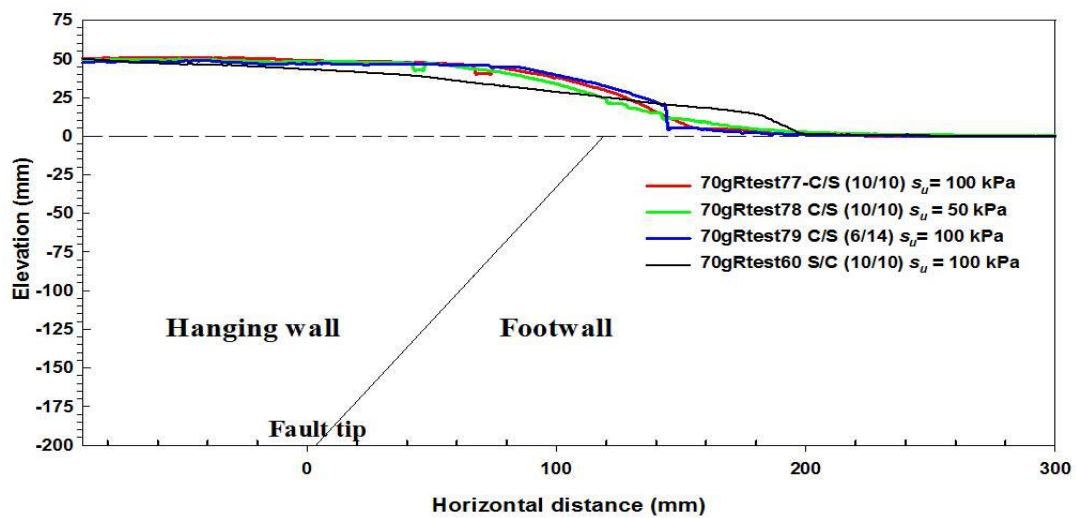


圖 5 不同剪力強度純黏土及砂試體逆斷層錯動試驗，地表剖面結果比較

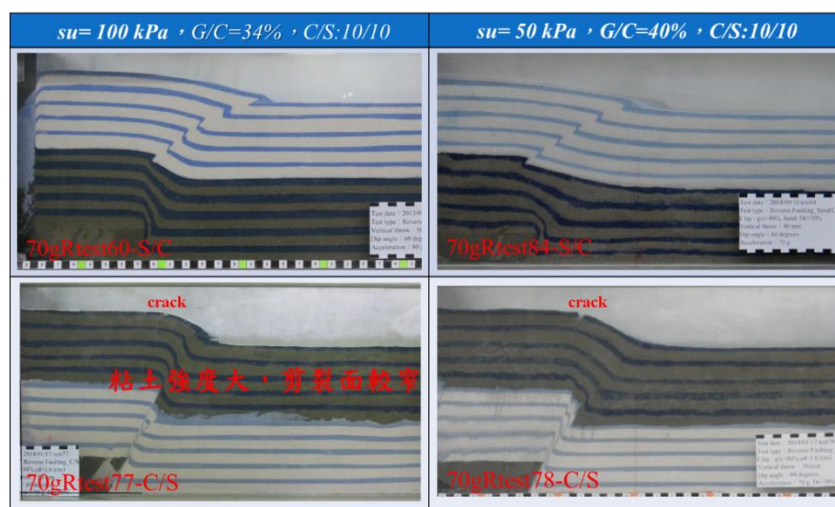


圖 6 不同土層逆斷層錯動試驗，垂直抬升量 5 cm，地下斷層跡剖面的比較。

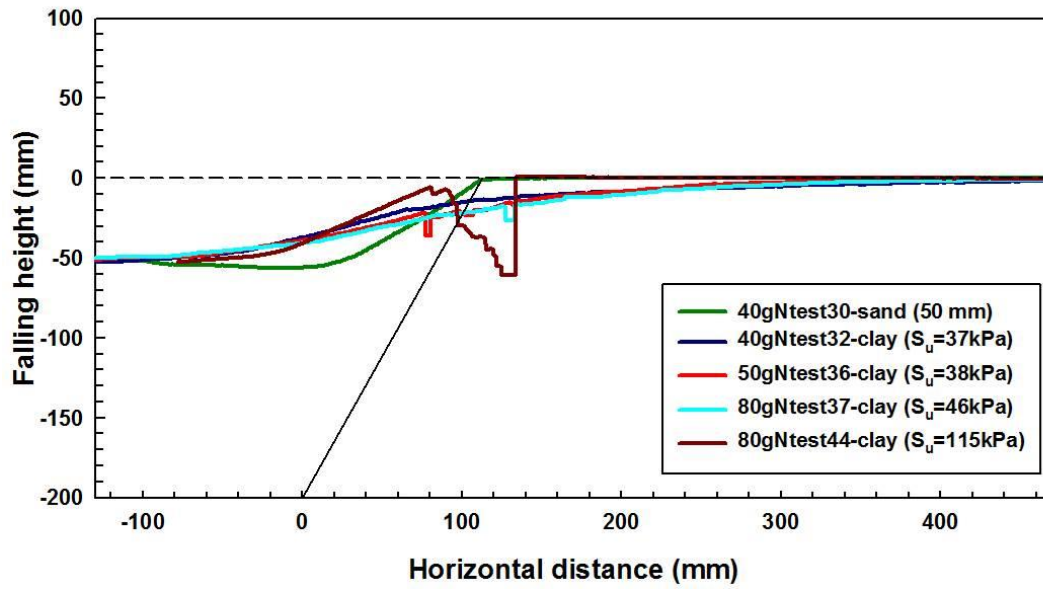


圖 7 不同剪力強度純黏土及砂試體正斷層錯動試驗，地表剖面結果比較

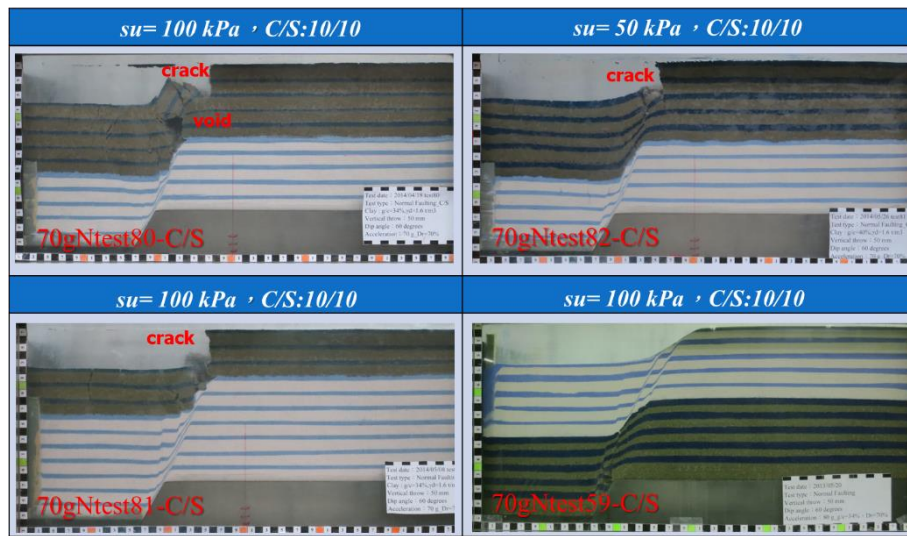


圖 8 不同土層正斷層錯動試驗，垂直陷落量 5 cm，地下斷層跡剖面的比較。

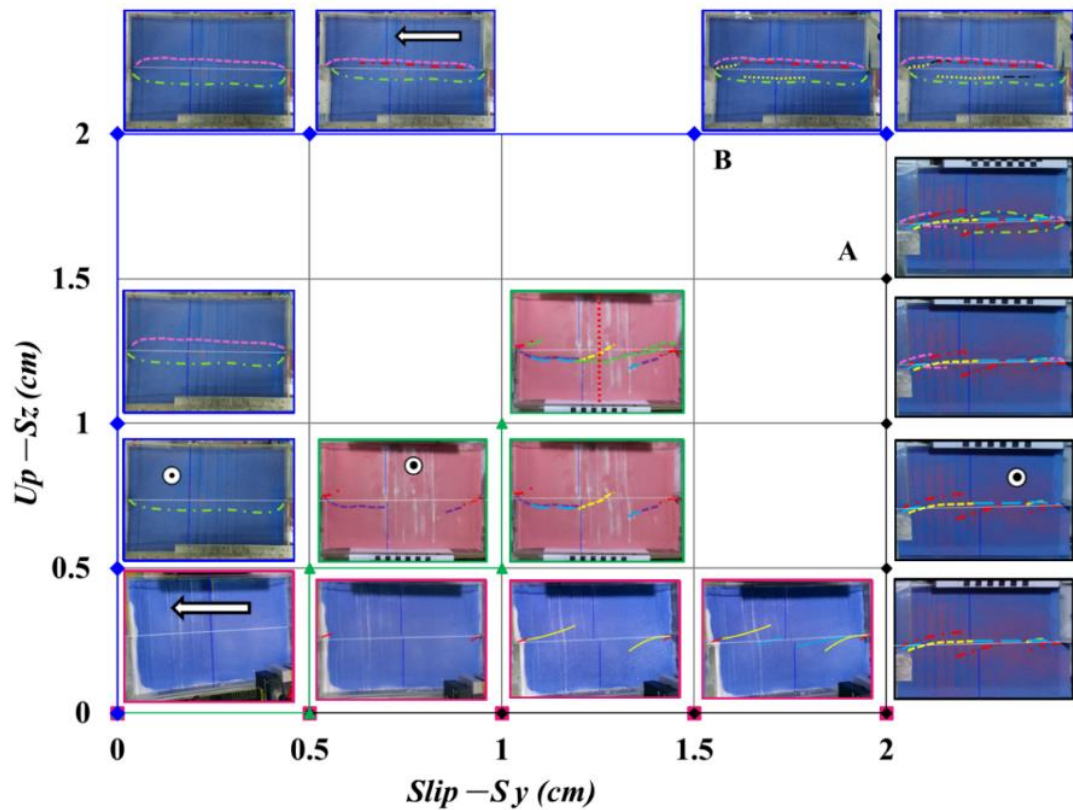


圖 9 橫移砂箱試驗之地表破裂跡歷程

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。

表 2 試驗結果單一斷層傾角之地表影響範圍

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	

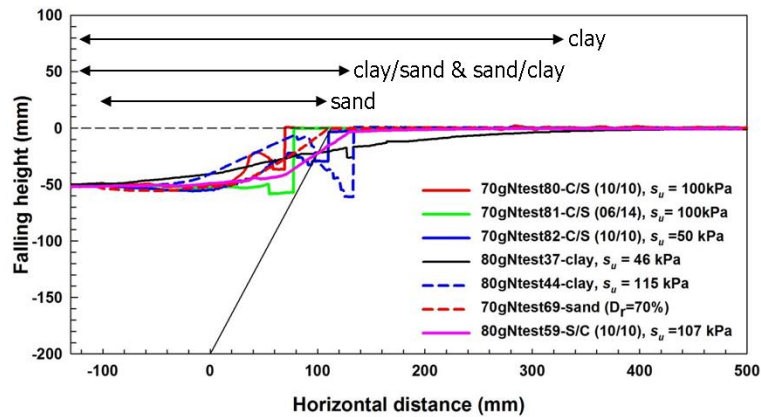


圖 10 不同覆土層材料對變形帶影響範圍比較

3. 數值模擬

利用 PFC2D 模擬不同傾角及不同覆土層強度的正逆斷層錯動，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及圖表如下：

(1) 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 x_{1m} 、 x_1 及 x_2 之最大影響範圍包絡線。可由包絡回歸之方式得 x_{1m} 、 x_1 及 x_2 之最大影響範圍，其包絡回歸方程是分別為：

I. 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：
 $x_2 = 1.282 + 0.037r$ 、出露點位置為： $x_{\text{outcropping}} = 1.102 + 0.031r$

II. 當斷層傾角大於 37.5°時， $r>0$

上盤影響範圍為： $x_1 = -0.612 - 0.022r$ 、下盤影響範圍為：
 $x_2 = 1.282 + 0.037r$ 、出露點位置為： $x_{\text{outcropping}} = 1.102 + 0.031r$

(2) 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 x_1 及 x_2 ，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：

I. 當 $0 < r < 3\%$ 時

上盤影響範圍為： $x_1 = -0.02 - 0.025r$ 、下盤影響範圍為：
 $x_2 = 0.01 + 0.08r$

II. 當 $r > 3\%$ 時

上盤影響範圍為： $x_1 = -0.232 - 0.039r$ 、下盤影響範圍為：
 $x_2 = 0.198 + 0.029r$

4. 斷層與結構物互制關係

台灣常見之建物基礎型式為淺基礎(shallow foundation)、樁基礎(pile foundation)、沉箱基礎(caisson)以及隧道(tunnel)或維生管線

(utility pipeline)等，有為數不少建物之基礎靠近可能之斷層帶，一旦斷層發生錯動，若基礎本身建築於上盤或下盤，或甚至是橫跨斷層線，都可能使得基礎，乃至於建築物發生損壞，造成生命財產的損失。基礎座落於地下，其相對於斷層線的距離、斷層本身錯動量及位移特性以及土壤性質等，均會影響到兩者之間互制之關係，因此相關文獻中對於不同基礎型式在受到斷層錯動時之受力與變形特性進行實驗、數值分析以及現地調查，以了解其受力變形特性。

(1) 結構物位於逆斷層覆土層之上

以基礎位於逆斷層下盤而言，載重愈大，基礎旋轉角愈小，以五層樓高之建築載重為例，當斷層錯動量為地層厚度 25% 時，其旋轉角約在 5 度左右。以基礎位於上盤，且為五層樓高之載重而言，基礎寬度愈寬，其旋轉角度愈小。基礎跨過斷層帶時之旋轉角度最大，當斷層錯動量為地層厚度 25% 時，其最大旋轉角約在 25 度左右。

(2) 結構物位於正斷層覆土層之上

基礎位於上盤或下盤位置時，基礎旋轉角度均較基礎跨過斷層線之值小，基礎位於下盤位置時，其水平位移及垂直最小，離心機實驗結果與前述文獻說明之結果類似，以淺基礎座落於正斷層下盤為較佳之選擇，就載重而言，結構物載重越大，基礎旋轉角度越小。

(3) 以工程方式解決斷層錯動對結構之影響

Oettle 與 Bray 在 2013 年亦提出地震引致地表破裂時之基礎工程破壞防治對策如下：

1. 將地表變形藉由工程方式傳遞到較大範圍：此一策略主要需要較厚之覆土層，同時其覆土之力學行為偏向韌性破壞，可避免結構受過大之力矩。
2. 讓基礎產生剛體位移以避免結構損壞：使用較厚或鋼筋比較高之鋼筋混凝土基礎版，則其對於基礎上方之結構物有較高能力之抵抗；當基礎版厚度愈厚時(不論正逆斷層)，其結構之樓地板所受力矩大幅下降(且不達到降伏力矩)
3. 使靠近地表之破裂點轉向並避開結構物：包括基礎下方土壤進行地盤改良(夯實或施加人造材料等)、預計斷層在地表出露點與結構物之間使用連續壁、設置高強度之地下室結構等，另外，Bray 亦指出結構物本身之重量亦能夠將潛在之斷層地表破裂跡引開並遠離結構物

5. 機率式斷層位移危害度分析(PFDHA)

由於近年來鄰近斷層重大設施之可靠度受到社會大眾極高的重視，Youngs et al (2003)針對美國核廢料儲存場址 Yucca Mountain 相對於斷層所在位置，提出評估斷層錯動下位移量超越機率之方法，以探討某場址在使用年限下之結構安全性，此一方法稱為機率式斷層位移危害度分析(PFDHA, Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis)

PFDHA 可用地震法以及位移法進行主斷層以及遠離主斷層之可能位移量評估。地震法主要仰賴各不同性質斷層(正斷層、逆斷層或

平移斷層)之經驗公式，以評估在某可能地震規模下，發生地表破裂之機率，並找出沿主斷層線或遠離主斷層線不同位置對應之位移超越機率，以對於某場址之可能位移量進行評估。位移法主要利用斷層挖溝或是歷史資料定年之方式找出該地點之事件滑移速率以及事件平均位移量，對於位移超越機率部分，則可考慮使用正規化位移量搭配統計上較常用之分佈曲線(如 Gamma 分佈)，以進行後續計算。

研究針對平均位移量或最大位移量之推估進行探討，並將如台灣集集地震(1999)以及中國汶川地震(2009)等八個逆斷層錯動事件列入資料庫內進行分析，提出評估之經驗公式(AD ， MD 單位均為公尺， m 為地震矩規模)如下：

$$\log(AD) = 0.3244m - 2.2192, \sigma = 0.17, R^2 = 0.62$$

$$\log(MD) = 0.5102m - 3.1971, \sigma = 0.31, R^2 = 0.53$$

針對正斷層以及逆斷層之位移危害度分析，即可利用上述方法進行探討，並依不同斷層破裂長度，滑移速率以及迴歸年等，定出危害度曲線，以滿足工程設計所需。

關鍵詞：活動斷層、近地表變形、離心機砂箱實驗、土壤結構互制、退縮距離、減災工法