

2015「台灣地震損失評估系統」講習會

活動斷層近地表變形特性研究

-如何與活動斷層災害和平相處

林銘郎¹、李崇正²、黃文正²、黃文昭³、詹佩臻¹、粘為東¹、
林燕慧⁴、陳盈璇⁴、盧詩丁⁴、劉桓吉⁵

¹ 國立台灣大學土木工程系 ² 國立中央大學土木工程系

³ 國立中央大學應用地質所 ⁴ 經濟部中央地質調查所、

⁵ 臺北市立教育大學地球環境及生物資源學系

2015-11-23

國家地震工程研究中心演講廳 (101室)



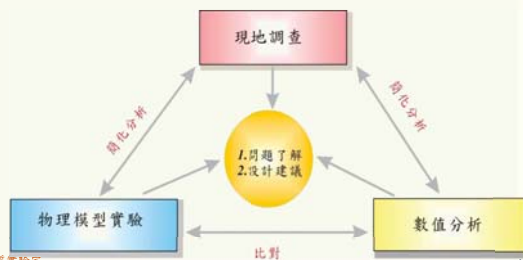
斷層活動？不活動？-上午的演講

活動斷層—有”持續心跳”的斷層嗎？斷層在那裡？看的出它的作用嗎？它是那一種斷層？活躍的程度？



活動斷層近地表變形特性研究

- 前言(研究動機、目的與研究方法)
- 探討斷層兩側上覆土層變形行為(包含剪切帶發展、遷移及影響參數等)
- 斷層錯移在近地表可能影響範圍-地質法之活動斷層地質敏區
- 活動斷層作用與結構物(淺基礎、樁基、地中構造物)互制行為與案例



國立臺灣大學工程地質實驗室

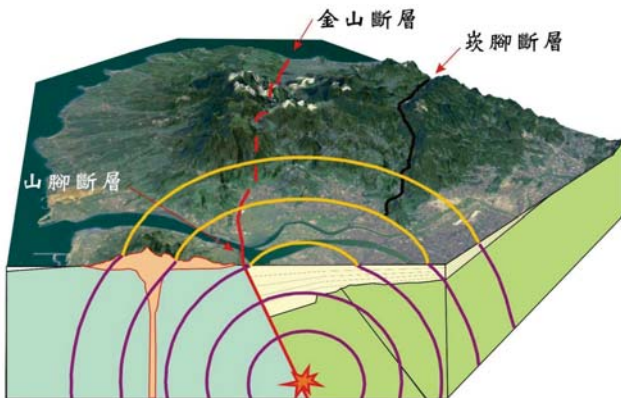
前言—台灣活動斷層分布圖-人口密集都會

斷層(斷層型態)	斷層跡經過的人口密集區
1 山腳斷層(正斷層)	台北市、台北縣
2 湖口斷層(逆斷層)	新竹縣
3 新竹斷層(逆斷層)	新竹縣市
4 新城斷層(逆斷層)	新竹科學園區
5 三義斷層(逆斷層)	苗栗縣、台中縣
6 大甲斷層(逆斷層)	台中縣
7 屯子腳斷層(橫移斷層)	苗栗縣、台中縣
8 彰化斷層(逆斷層)	台中縣、南投縣
9 車籠埔斷層(逆斷層)	台中縣市
10 梅山斷層(橫移斷層)	嘉義縣
11 新化斷層(橫移斷層)	台南縣市
12 後甲斷層(逆斷層)	台南縣市
13 旗山斷層(逆斷層)	高雄縣市
14 米崙斷層(橫移斷層)	花蓮市
15 利吉斷層(逆斷層)	台東縣市



都會型地震(陳文山教授提供)

土壤覆蓋-放大地震動效應但緩衝變形影響
高樓、捷運、維生管線、...，不怕一萬，只怕萬一
面對極端天然災害的態度：小震不壞、中震可修、大震不垮

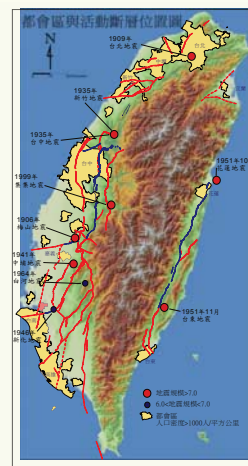


5

都會型地震

台灣都會區與活動斷層位置圖
(陳文山教授提供)

- 1985年-思亮館-九三五年新竹、台中地震紀念研討會-歷史上死傷人數最多的地震，顏滄波教授、蔡義本教授...



國立臺灣大學工程地質實驗室

6

車籠埔斷層錯動對壩體之影響-岩盤中
世界上第一座被地震斷層所直接錯斷的混凝土壩

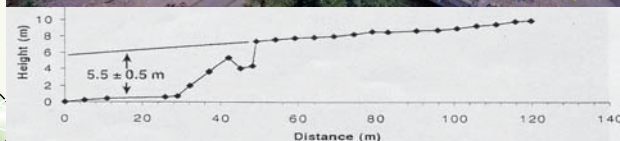


右岡壩:取自連永旺:大地裂痕

車籠埔斷層錯動對橋樑之影響-岩盤中



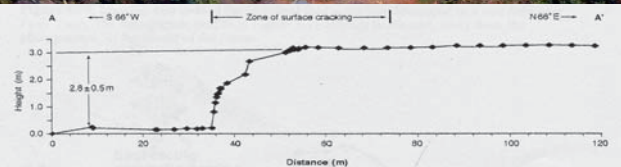
埤豐橋:取自連永旺:大地裂痕



車籠埔斷層錯動對地表變形之影響-有上覆土層



光復國中操場:取自連永旺:大地裂痕



**車籠埔斷層錯動對地表變形之影響-有上覆土層-
豐原中正公園及其附近的地表變形
:主斷層與背衝斷層是否分開考量**



Photograph by Yung-Wan Lien 連永旺

國立臺灣大學工程地質實驗室

豐原中正公園附近建築物受損照片〔劉桓吉攝於民國880925〕



國立臺灣大學工程地質實驗室

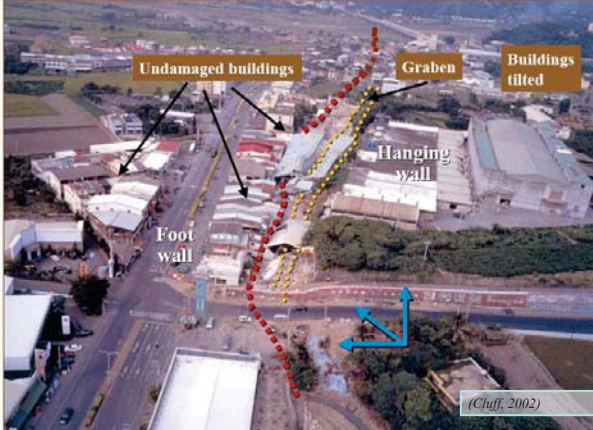
活動斷層災害-集集地震的斷層斷裂與結構受損



中台護專(中臺科技大學)附近

車籠埔斷層錯動對地表變形之影響-有上覆土層 -上盤變形大於下盤

✦ 南投縣東山路附近(圍牆保存了上覆土層變形的樣貌)

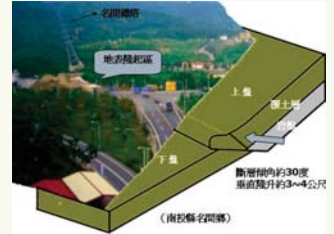


13

車籠埔斷層錯動對地表變形及結構之影響-有上覆土層 一樣鐵塔兩樣情



霧峰鳳梨園鐵塔與斷層交會
〔劉桓吉攝於民國881020〕



名間鐵塔:改繪自連永旺之大地裂痕



國立臺灣大學工程地質實驗室

14

斷層錯動對地表變形型態之主要影響因素 (Bray et al, 1994)

- ❖ 斷層運動型態
 - 正斷層
 - 逆斷層
 - 橫移斷層
- ❖ 斷層傾角
- ❖ 斷層錯動量
- ❖ 覆土層厚度
- ❖ 覆土層力學參數

斷層特性

覆土層特性

本研究

➡ 斷層、土壤、結構物 三者間之互制行為



國立臺灣大學工程地質實驗室

15

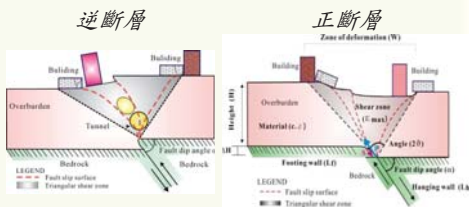
斷層錯動對地表變形及結構之影響研究內容



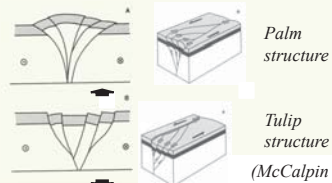
16

活動斷層引致上覆土層變形之影響

- ✦ 斷層尖端位置?
- ✦ 斷層形式?
- ✦ 斷層面傾斜角度?
- ✦ 土體的強度與變形特性?
- ✦ 土體內應力、應變的空間分布?三角形的剪切變形帶
- ✦ 對不同結構物之影響?



橫移斷層/斜移斷層-花狀斷層系統



國立臺灣大學工程地質實驗室

17

主要課題-從工程師的角度

- ✦ 斷層錯動時對上覆沖積土層之變形分佈影響
 - 除了斷層跡外，沖積土體的變形也是重點
- ✦ 斷層錯動時對上覆沖積層之應力分佈影響
 - 當土壤尚在彈性狀態時，要了解沖積層中土壤的應力狀態與應變的大小範圍
 - 當土壤已進入塑性狀態時，要了解沖積層中的塑性區範圍與塑性應變的大小範圍
- ✦ 工程結構物位於斷層附近時，斷層錯動對其所造成應力與變形行為探討
 - 土壤與結構之互制行為
 - 小震不壞、中震可修、大震不垮



國立臺灣大學工程地質實驗室

18

逆斷層-Reverse Fault-

✦ 1999 M 7.5 Chi Chi (Taiwan) Earthquake, Taiwan

✦ 上盤岩層地震錯動後，懸空崩落。



19

正斷層-Normal Fault

✦ 2011 M 7.0 Hamadori Earthquake, Japan

✦ 斷層崖、上下盤開裂



Photo from ERI, 2011

橫移斷層-Strike-Slip Fault

✦ 2010 Mw 7.1 Darfield Earthquake, New Zealand



Photo from Barrell et al., 2011

20

現地資料歸納整理-地形地貌觀測-塵封的裂痕

---斷層錯動引致之地層變形型態(Bonilla,1975)

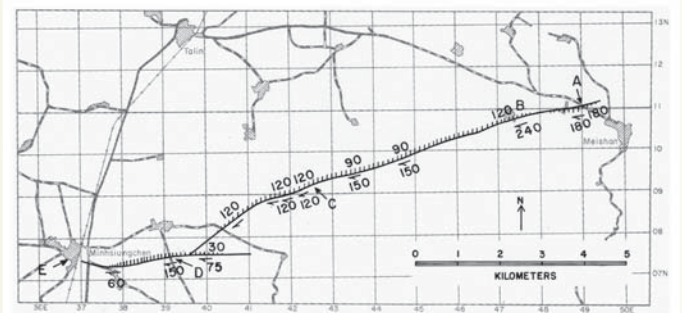


Figure 2. Map showing location and displacements on the 1906 Meishan fault trace, after Omori (1907). Displacements given in centimeters; numbers with arrows indicate horizontal displacements. Numbers without arrows indicate vertical displacement; bars on downthrown side. Letters show localities discussed in text.



國立臺灣大學工程地質實驗室

22

現地資料歸納整理-1906年梅山地震-國內案例

---斷層錯動引致之地層變形型態(Bonilla,1975)



Figure 3. View westward along 1906 fault scarp about 1 km northwest of Meishan. Vertical displacement of 1.8 m and right slip of 1.8 m occurred in this vicinity in 1906. Photo taken in January 1973

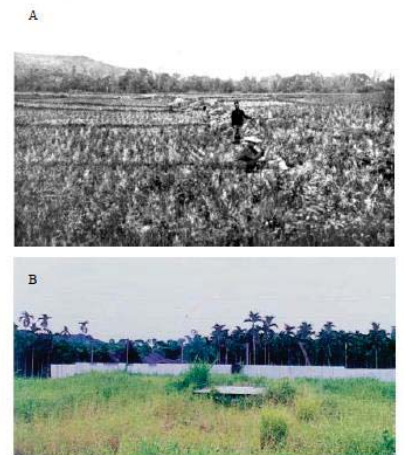


國立臺灣大學工程地質實驗室

23

梅山斷層經百年風化、侵蝕及人為活動，斷層跡在那兒？

1906梅山地震百週年紀念研討會，石同生等人(2006)

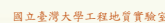
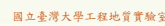


圖八 A圖為台灣日日報(1906)所拍攝當時之變形田埂之照片(A圖照片摘自劉世楠,1998)。B圖變形田埂位於照片中橫樹後方竹林中，背後之山崖為A圖照片中之山崖。



國立臺灣大學工程地質實驗室

24

國立臺灣大學工程地質實驗室國立臺灣大學工程地質實驗室

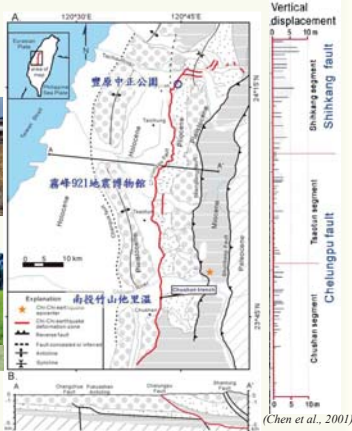
921地震斷層地表破裂帶(Mw 7.6)

70 %的地表破裂帶沿既存的斷層破裂(Ota et al, 2005)

斷層崖



褶皺崖

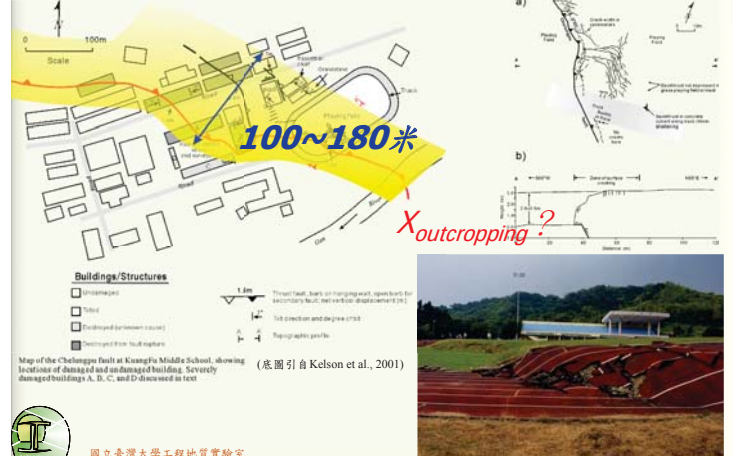


(Chen et al., 2001)



國立臺灣大學工程地質實驗室

光復國中(921地震博物館)的地表變形



(底圖引自 Kelson et al., 2001)

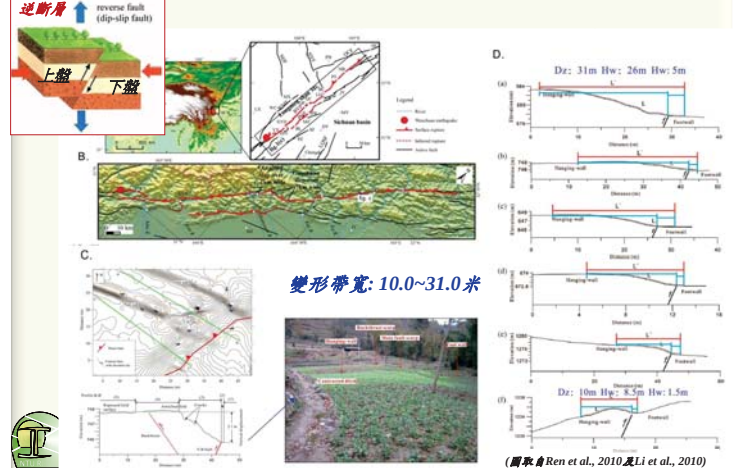


國立臺灣大學工程地質實驗室

竹山他里溫地表變形帶-車籠埔斷層博物館



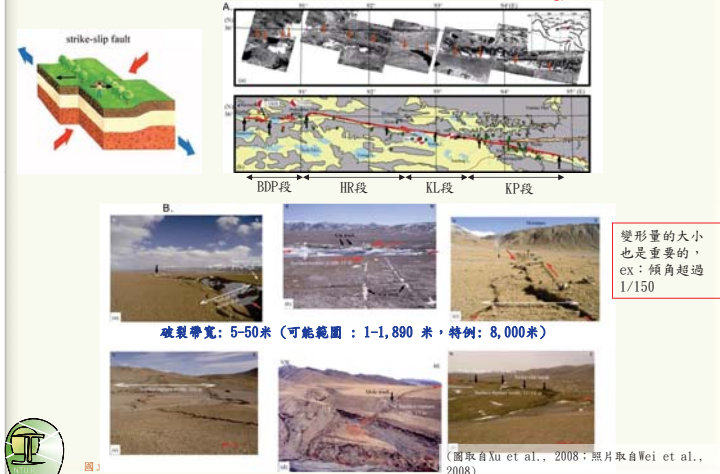
12 May 2008 Mw 7.9 Wenchuan EQ, China



(圖取自 Ren et al., 2010 及 Li et al., 2010)



14 Nov. 2001 Mw7.8 Kunlunshan EQ, China

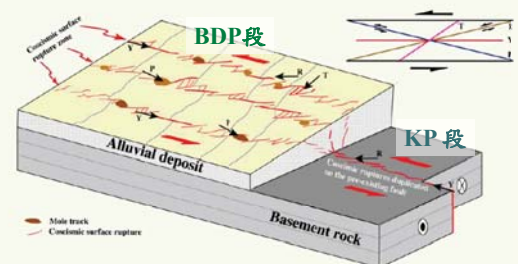


(圖取自 Xu et al., 2008; 照片取自 Wei et al., 2008)

14 Nov. 2001 Mw7.8 Kunlunshan EQ, China

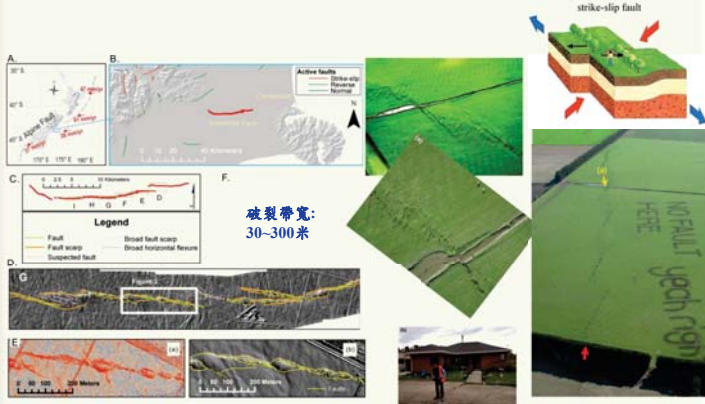
Lin Aiming et al. (2011) 指出通常在未固結沖積層厚的地方，破裂帶相對較寬，出現在近乎全KL段及部份的HR段；在未固結沖積層薄或缺乏的地方，破裂帶相對較窄，出現在近乎全KP段。再者，出現在未固結沖積層厚的破裂帶通常由數道個別的破裂帶所組成，各道的寬度，較僅會出現一道的沖積層薄的破裂帶也要寬許多，且數道個別的破裂帶的跨距為個別的3-10倍寬。

Kunlun地震同震地表破裂帶的模式(Lin, A. et al., 2011)



國立臺灣大學工程地質實驗室

4 Sept. 2010 M_w 7.1 Darfield EQ, New Zealand

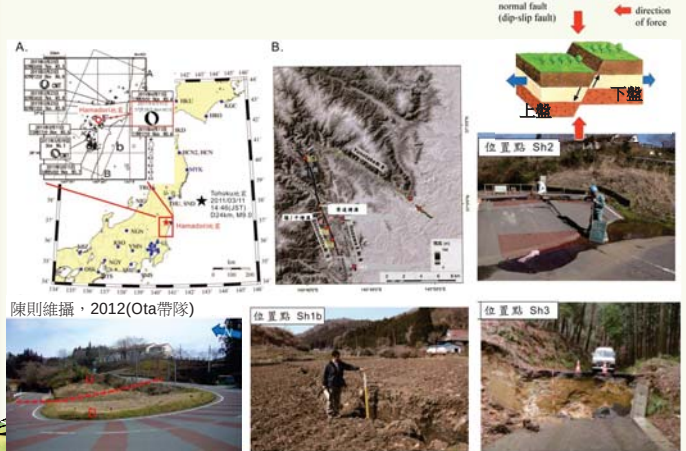


(Figs and Photos from Barrel et al., 2011)



國立臺灣大學工程地質實驗室

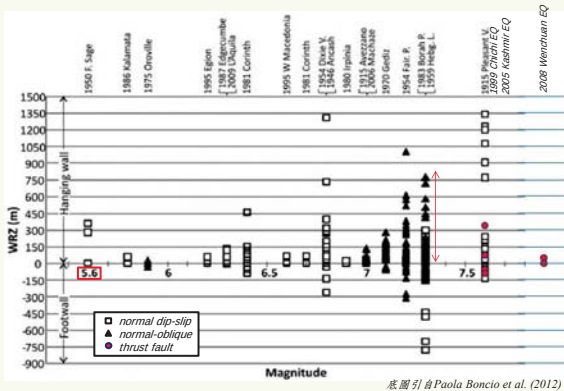
11 April 2011 M_w 6.6 Hamadori EQ, Japan



國立臺灣大學工程地質實驗室

(資料來源ERI網頁，圖及照片修改或取自丸山正等，2012)

圖4 歷史地震同震地表破裂範圍 (Width of the Rupture Zone (WRZ))



底圖引自Paola Boncio et al. (2012)

1. 地震規模越大，則地表影響範圍有越大的趨勢，但還是要考量地質構造。
2. 上盤影響範圍比下盤大，但需注意上下盤分界的定義



槽溝開挖-提供土層變形特徵資料 竹山槽溝—陳文山教授提供



國立臺灣大學工程地質實驗室

40

斷層槽溝開挖---竹山槽溝(陳文山,2004)



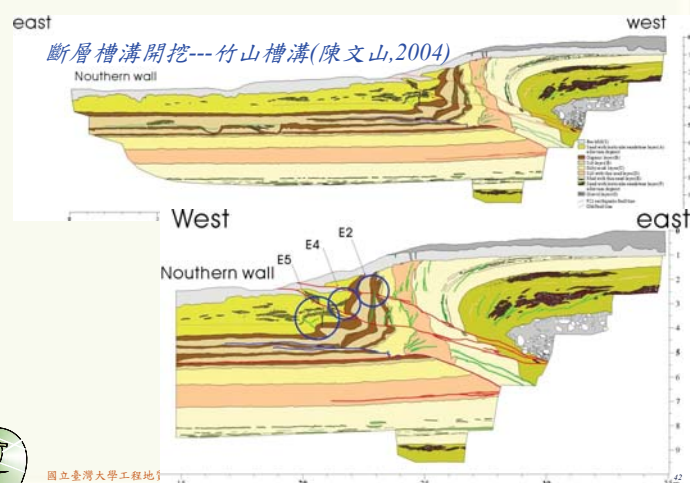
槽溝開挖-提供土層變形特徵資料



國立臺灣大學工程地質實驗室

41

現地資料歸納整理-斷層挖溝剖面-至少動了四次



國立臺灣大學工程地質實驗室

42

- 1 上覆土層地層剖面中的變形型態是如何形成？
- 2 主要影響因素為何？--斷層尖端圓潤化，解決銳角尖端之數值問題
- 3 大變形，多次變形，多條集中變形帶
- 4 三角形剪切變形帶與集中剪切變形帶

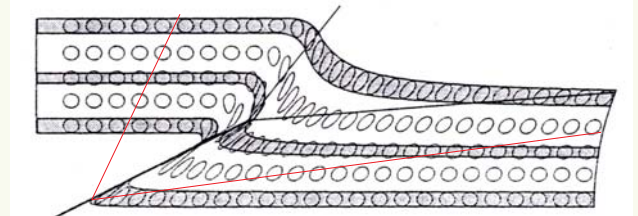


國立臺灣大學工程地質實驗室

43

上覆土層之變形特性:三角剪切變形帶

Kinematics model---Trishear Model(Allmendinger, 1998)



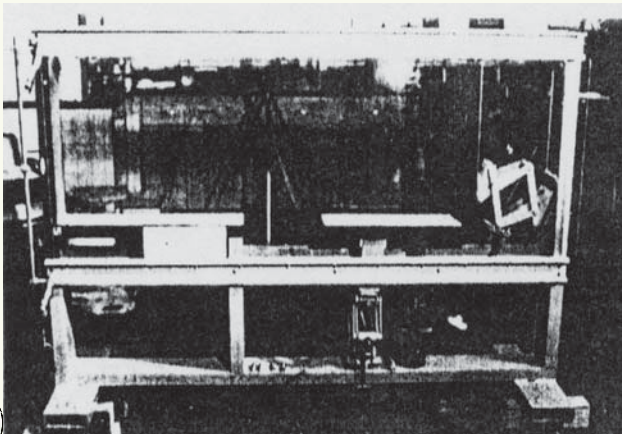
1. 三角剪切帶變形-土壤變形
2. 越靠近斷層尖端變形越大
3. 地層傾角隨不同深度而改變
4. 土層厚度，影響越大，但土壤中的變形越小

國立臺灣大學工程地質實驗室

44

物理模型

---砂箱模型(Cole & Lade, 1984)

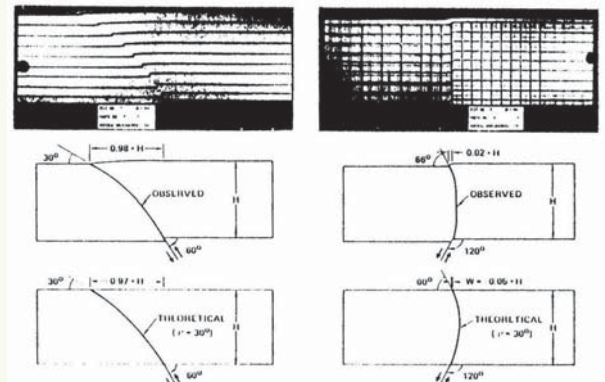


國立臺灣大學工程地質實驗室

45

物理模型

探討不同斷層傾角下，上覆土層破裂帶之分佈範圍 (W/H) Cole & Lade (1984)



國立臺灣大學工程地質實驗室

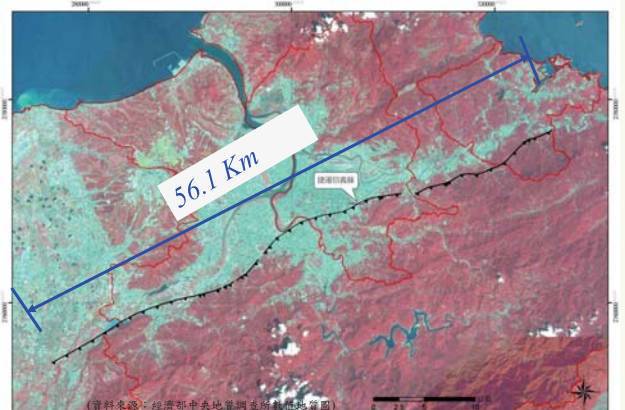
46

模型建立



模型建立

台北斷層位置分布圖



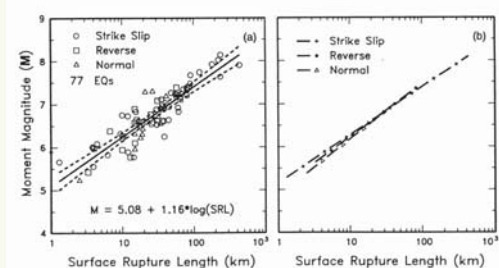
資料來源：中央大學太空遙測研究中心(SRIT, 2003)

圖2-5-3 台北斷層附近衛星影像

48

台北斷層之數值分析參數-地震規模

Wells & Coppersmith(1994)整理世界各地421筆地震記錄，並以其中244筆記錄較為完整可信者，統計各項地震與斷層參數之關係。

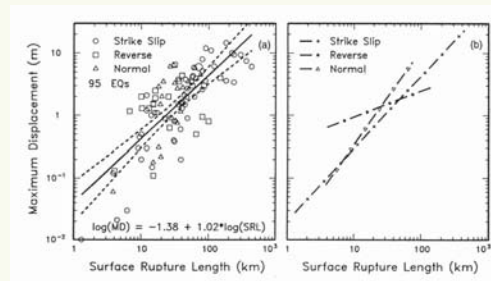


台北斷層長56.1公里 → 台北斷層之地震規模 $M=7.1$



台北斷層之數值分析參數-最大地表錯動量

Wells & Coppersmith(1994)

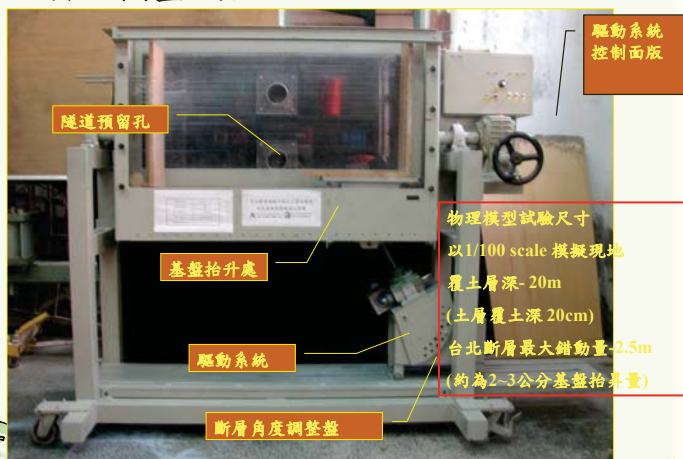


台北斷層長56.1公里

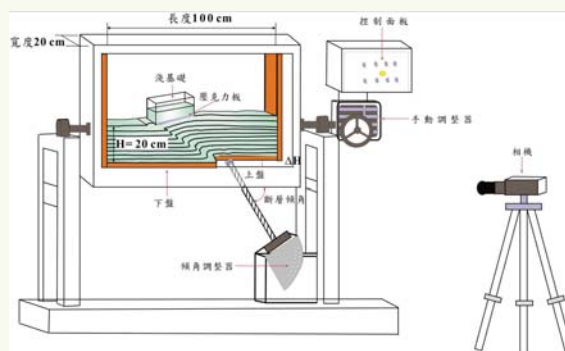
→ 最大地表錯動量 $MD=2.5m$



物理模型試驗 砂箱尺寸長120cm，高60cm，寬20cm



物理模型試驗 砂箱尺寸長120cm，高60cm，寬20cm



物理模型試驗



試驗砂-越南石英砂
採用貫降器-以固定落距控制相對密度
每2cm鋪染色砂一層以利觀測



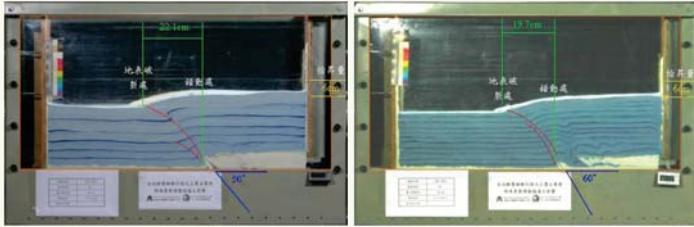
物理試驗結果

- ✿ 土層覆土深 20 cm
 - ✿ 基盤垂直抬昇量 6 cm
- 做以下之比較：
1. 不同角度：50°、60°
 2. 置入隧道與自由場
 3. 隧道位置：1D 與 2D

物理模型試驗尺寸
以1/100 scale 模擬現地
覆土層深-20m
(土層覆土深20cm)
台北斷層最大錯動量-2.5m
(約為2-3公分基盤抬昇量)



1.不同斷層傾角比較



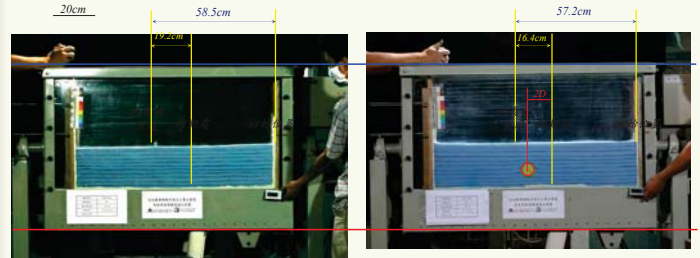
斷層傾角50°

斷層傾角60°

上覆砂土層均產生兩條剪切帶，剪切帶發展順序均由上盤向下盤遷移。
斷層角度較緩時，剪切帶角度較緩而偏向下盤，變形帶範圍較廣。



2.置入隧道與自由場之比較



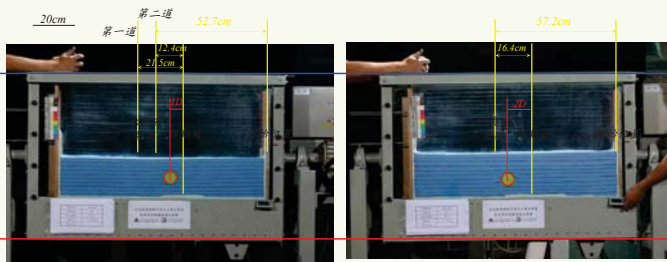
自由場

置入隧道

隧道之存在，限制剪切帶之發展，剪切帶角度較陡。
隧道位於2D時並無明顯移動、變形。



3.隧道距斷層1D與2D之比較



距斷層1D

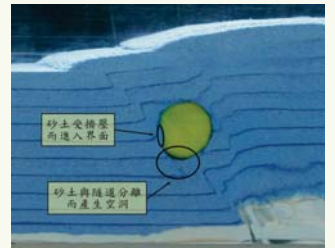
距斷層2D

隧道位於1D時 剪切帶發展趨勢不同(下方之剪切帶先發展)
隧道可見明顯之位移、變形



砂箱試驗特徵 - 1D

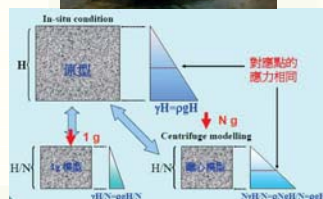
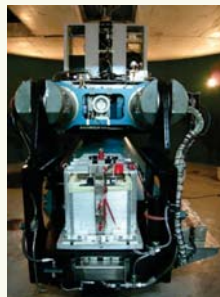
- ✦ 隧道受壓後變形為橢圓形。
- ✦ 隧道下方於抬昇過程中產生空洞。
- ✦ 隧道左方砂土受壓擠入界面。



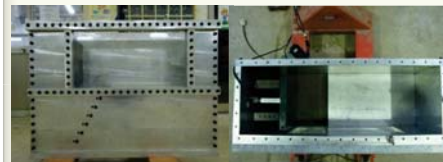
物理模型

✦ 離心模型與原型之相似性 (中大團隊)

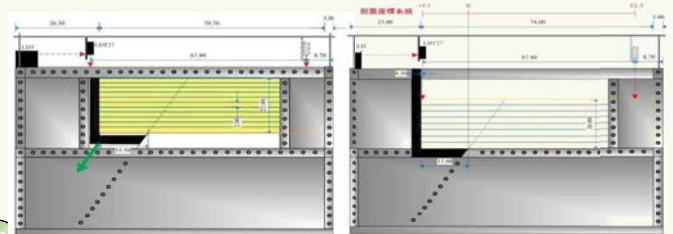
物理量	單位	因次比 (離心模型/原型)
加速度(acceleration)	m/sec ²	N
長度(linear dimension)	m	1/N
應力(stress)	kPa	1
應變(strain)	-	1
密度(density)	kg/cm ³	1
質量或體積(Mass or volume)	kg or m ³	1/N ³
單位重(unit weight)	N/m ³	N
力(force)	N	1/N ²
彎矩(Bending moment)	Nm	1/N ³
Bending moment/unit width	Nm/m	1/N ²
Flexural stiffness/unit width (EI/m)	Nm ² /m	1/N ³
壓密時間(time: diffuse)	s	1/N ²
時間(time: dynamic)	s	1/N
頻率(frequency)	1/s	N



室內試驗—離心機試驗之試驗箱配置圖



- 斷層錯動模擬試驗箱規格
- 最大斷層垂直頂升變位: 5.5 cm
 - 垂直頂升速率: 0.1 ~ 2 mm/min
 - 最大試驗g值: 80 g
 - 斷層傾角: 60度
 - 試驗斷層種類: 正斷層或逆斷層



斷層錯動模擬試驗箱細部構造



試驗箱空箱 (正面)



試驗箱內部L型升降推板



馬達及齒輪箱 (試驗箱背面)

壓力觀景窗



全期計畫的砂箱實驗工作內容

1. 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試驗。本研究共完成85組不同g值的離心模型試驗，來觀察地下斷層跡的發展及地表變形剖面及範圍。
2. 傾角90度橫移斷層通過砂土層之1g模型試驗，共完成4組試驗，來觀察地表下之花狀構造及地表形範圍。
3. 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。
4. 綜合研析離心模型試驗資料及數值模擬的結果，提出適合活動斷層之地表變形範圍的經驗公式及圖表。



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：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

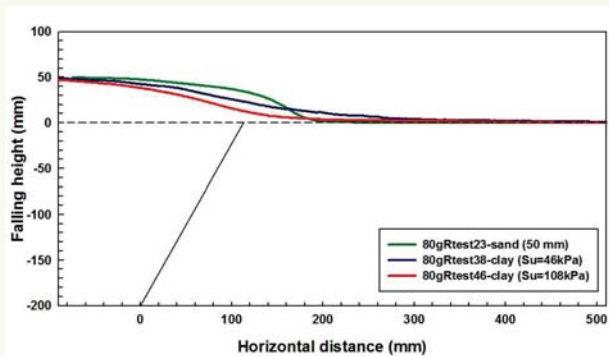


圖6 不同土層逆斷層錯動試驗，垂直抬升量5 cm，地下斷層跡剖面的比較(白色是砂，深色是油粘土)

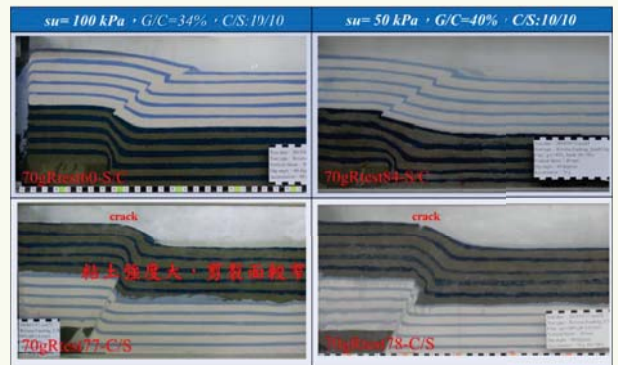


圖7 不同剪力強度純黏土及砂試體正斷層錯動試驗，地表剖面結果比較：在砂土試體實驗結果中得到覆土層之影響範圍約為0.8倍覆土層厚度；在黏土試體實驗結果中得到覆土層之影響範圍約為1.9倍覆土層厚度

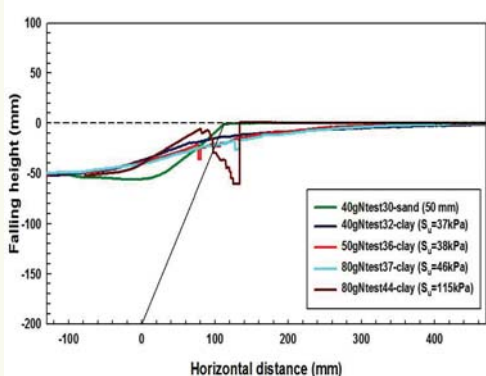
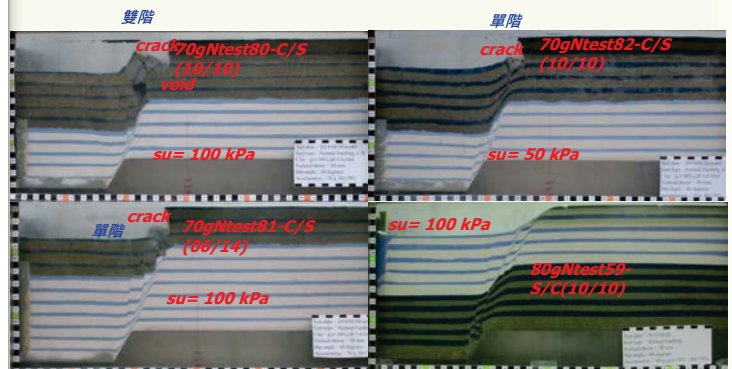
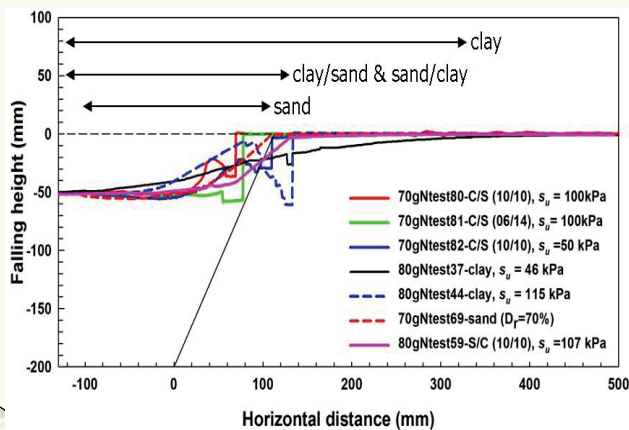


圖8 不同土層正斷層錯動試驗，垂直陷落量5 cm，地下斷層跡剖面的比較



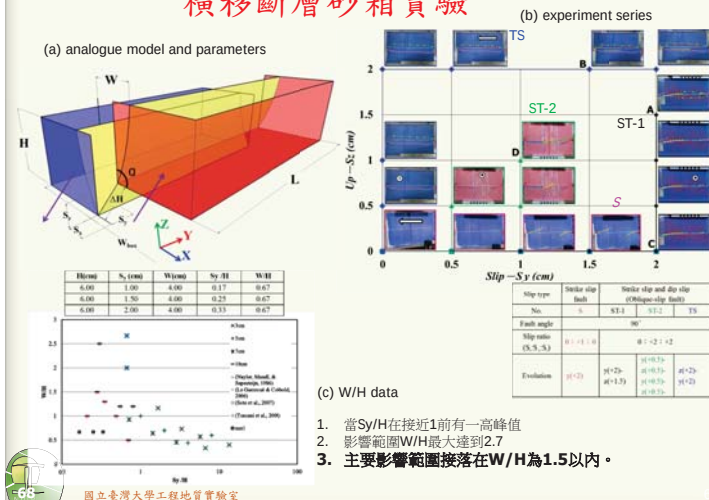
不同覆土層材料對變形帶影響範圍比較



國立臺灣大學工程地質實驗室

67

橫移斷層砂箱實驗



國立臺灣大學工程地質實驗室

不同位移路徑下之地表變形

試驗	TS	ST-2	ST-1
試驗結果照片			
位移路徑	抬升2公分	平移-抬升-平移-抬升 間距0.5公分	平移2公分
總位移量	2公分		
影響範圍	5.5公分	6公分	5.5公分
地表地形主要成因	崩崖(綠色) 堆積前緣(粉色)	R-shear(黃色) 堆積前緣(綠色)	R-shear(紅色)

國立臺灣大學工程地質實驗室

表2 試驗結果單一斷層傾角之地表影響範圍

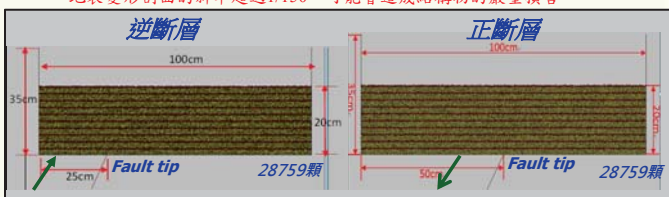
地表影響範圍	砂土層	黏土層
逆斷層(60度斷層)	1.0H	2.2H
正斷層(60度斷層)	0.8H	1.9H
斜移斷層(90度斷層)	1.5H	

國立臺灣大學工程地質實驗室

70

逆正斷層數值模擬：影響範圍決定

地表變形剖面的斜率超過1/150，可能會造成結構物的嚴重損害



斷層型式	逆斷層(共40組)	正斷層(共240組)
傾角	22.5°、30°、37.5°、45°、52.5°、60°、67.5°、75°、82.5°、90°	22.5°、30°、37.5°、45°、52.5°、60°、67.5°、75°、82.5°、90°
g值	70g(約14m)	25g、50g、75g(約5m、10m、15m)
砂土摩擦角	30°、33°、36°、40°	33°、35°、36°、40°、41°、47°、52°、60°

國立臺灣大學工程地質實驗室

71

斷層錯動對結構之影響

- 內政部營建署基礎構造設計規範對於建築物可容許之角變量，提出各種狀況下之容許值，如下表所示
- Bray與Oettle (2012)亦對於建築物可能破壞狀況提出可容許之角變量或差異沉降，如液化引致之建築物沉降量可容許值約為4英吋(10公分)，若因斷層錯動產生之沉降能夠符合建築物可以容許之沉降量或差異沉降，則或許可以參照相關之工程處置方式進行處理及應對，而不是消極地避開活動斷層之附近區域。

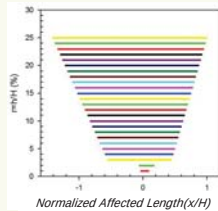
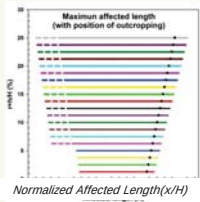
角變量	建築物損壞程度
1/600	斜撐之構架有受損之危險
1/500	建築物不容許裂縫產生的安全限度(含安全係數)
1/300	隔間牆開始發生裂縫(不含安全係數)
1/250	剛性之高層建築物開始有明顯的傾斜
1/150	隔間牆及磚牆產生相當多的裂縫
1/150	可撓性磚牆之安全限度(含安全係數)
1/150	建築物產生結構性損壞

國立臺灣大學工程地質實驗室

逆正斷層影響範圍總表及公式 Normalized Affected Length(x/H)

逆斷層

正斷層



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: $x_{2m} = 1.282 + 0.037r$

總影響範圍 $= 2.415 + 0.063r$

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: $x_2 = 1.282 + 0.037r$

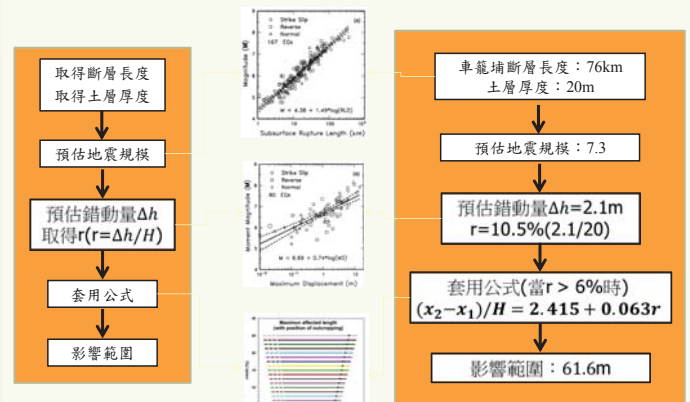
總影響範圍 $= 1.894 + 0.059r$



國立臺灣大學工程地質實驗室

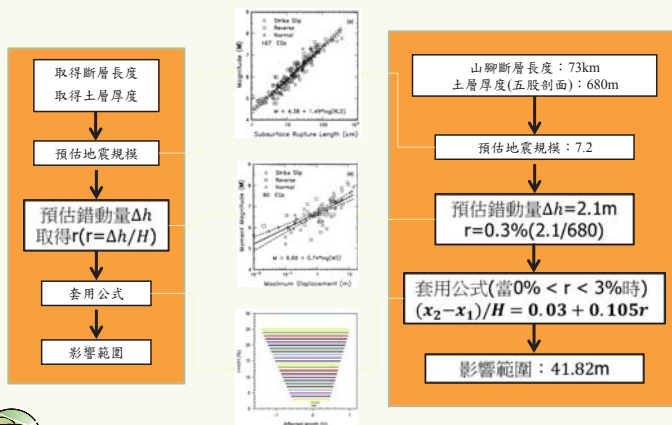
73

推估斷層影響範圍流程及範例(車籠埔斷層)



國立臺灣大學工程地質實驗室

推估斷層影響範圍流程及範例(山腳斷層)



國立臺灣大學工程地質實驗室

斷層退縮考量-地震引發之地表變形

Seismically Induced Ground Failure

美國加州法令(AP-1972;SHMA-1990)之施行經驗

阿奎斯特-布里奧洛地震斷層區劃分法案

Alquist-Priolo Earthquake Fault Zoning Act of 1972

1990年「地震災害潛感區劃分法案」

(Seismic Hazards Mapping Act of 1990)

參考:

- 2006- William A. Bryant-California Geological Survey
- 2009-Surface Fault Displacement Hazard Berkeley, CA, May 20-21, 2009; USGS/California Geological Survey/ PEER

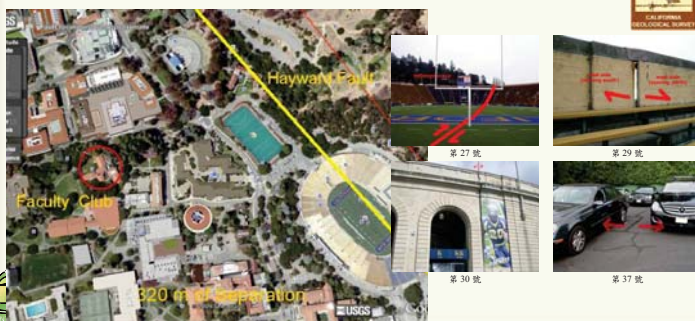


國立臺灣大學工程地質實驗室

76

地震引發之地表變形-美國加州法規實例 Seismically Induced Ground Failure

- 參考 William A. Bryant (2006)
- 加州地質局(California Geological Survey, CGS)
- 加州地質局地震災害潛感區域(Seismic Hazards Zoning)



77

阿奎斯特-布里奧洛地震斷層區劃分法案 Alquist-Priolo Earthquake Fault Zoning Act of 1972

- AP法案制定起因: 1971年聖弗南度(San Fernando)發生 M_w 6.6地震

(This Act resulted from the M_w 6.6 1971 San Fernando earthquake)

- 法案原稱為AP地質潛在災害法, 目的為減少地表變形危害

(The AP Act originally was referred to as the *Alquist-Priolo Geologic Hazards Act* and was intended to address a broader scope of ground deformation hazards.)

- 1989年洛馬普利塔(Loma Prieta)發生 M_w 6.9 Loma Prieta Earthquake, 發生許多液化及山崩災害, 地震後隔年制定地震災害潛感區劃分法案



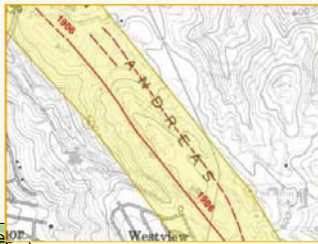
國立臺灣大學工程地質實驗室

78

CGS 地震影響地表破壞區域劃定計畫 (Seismic Ground Failure Zonation Programs)

- 1972 年「阿奎斯特-布里奧洛地震斷層區劃分法案」
(Alquist-Priolo Earthquake Fault Zoning Act)

- 地表破裂



- 1990 年「地震災害潛感區劃分法案」
(Seismic Hazards Mapping Act of 1990)

- 地盤破壞-山崩、液化



國立臺灣大學工程地質實驗室

79

CGS 地震影響地表破壞區域劃定計畫 (Seismic Ground Failure Zonation Programs)

- 找出較可能發生地表破裂之區域

(Identify where ground failure hazards are more likely to occur.)

- 劃定“加強調查區域”

(*Delineate* “zones of required investigation”)

- 催生“地質或大地工程潛在災害報告”，致使在潛災區建造耐震結構。

(*Trigger* “geologic or geotechnical hazards reports” that lead to earthquake resilient construction in hazardous areas)



國立臺灣大學工程地質實驗室

80

阿奎斯特-布里奧洛地震斷層區劃分法案 Alquist-Priolo Earthquake Fault Zoning Act of 1972

- 避免結構物跨越地表斷層破裂潛在災害區域，可減少災害的發生。

(Surface fault rupture hazard is mitigated by avoiding placing structures across traces of hazardous faults)

- 地震斷層區域是指該斷層具有足夠的活動性而且可以明確的定義。

(Earthquake Fault Zones-EFZ encompass hazardous faults, which are defined as those faults that are *sufficiently active* and *well-defined*)

- 足夠的活動性：在全新世還有活動證據
(*sufficiently active* faults exhibit evidence of Holocene displacement (approx. last 11,000 years).)
- 明確的定義：斷層跡可以由受過訓練之地質學家判定出來
(*well-defined* – trace detectable by trained geologist.)



國立臺灣大學工程地質實驗室

81

CGS地震災害潛感區劃分法案 (Seismic Hazards Mapping Act of 1990)

- 地震斷層區劃分法案與地震災害潛感區劃分法案的差異在減災的作法-地震斷層區劃分法案用避開的方式而地震災害潛感區劃分法案允許用工程設計

Liquefaction



Seismically Induced Landslides



1989 Mw 6.9 Loma Prieta Earthquake *Bryant (2006)*



國立臺灣大學工程地質實驗室

82

阿奎斯特-布里奧洛地震斷層區劃分法案 Alquist-Priolo Earthquake fault zoning Act of 1972

- 目的為減少地表斷層破裂潛災害



聖弗南度地震 *Bryant (2006)*
1971 San Fernando Earthquake



國立臺灣大學工程地質實驗室

83

地表受斷層錯動破裂的重複性

- 帝王斷層 (Imperial Fault) – 1940 與 1979 Earthquakes
- 台灣尚無同一地重覆發生歷史地震的案例

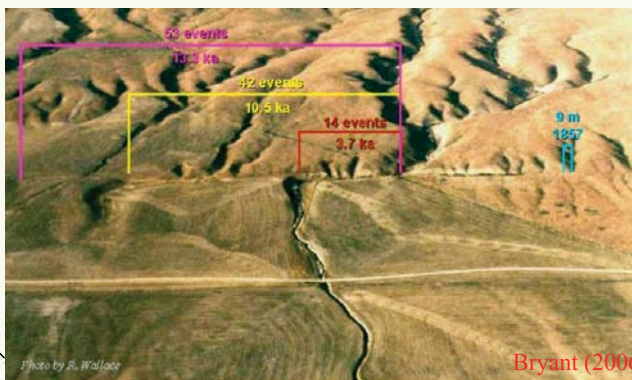


Bryant (2006)

84

地震斷層重覆錯動的證據

San Andreas Fault – 華萊士小溪 (Wallace Creek)



Bryant (2006)

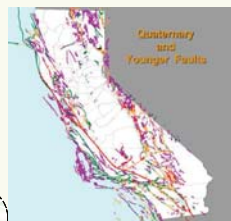


國立臺灣大學工程地質實驗室

85

如何繪製地震斷層區域-加州的斷層

- 10個分區的斷層評估與區域繪製 (10 Region Fault Evaluation and Zoning Program) Bryant (2006)



國立臺灣大學工程地質實驗室

86

建立索引-Index to Alquist-Priolo Earthquake Fault Zone Maps (1974-2005)



- 2006年已公告547幅地震斷層帶地圖 (547 Earthquake Fault Zone Maps issued as of 1/1/2006)

- 36個縣和104個城市受影響 (36 Counties and 104 Cities affected)

Bryant (2006)



國立臺灣大學工程地質實驗室

87

比較 AP Act 與 SHMA Act

- 制定時間：AP Act制定在先(1972)，SHMA制定在後(1990)，**兩法實施做法相當**。
(The Seismic Hazards Mapping Act (SHMA) is modeled after the Alquist-Priolo (AP) Act. Implementation of the SHMA generally is the same as for the AP Act)
- 重要差異：AP Act**避免**建物經過地震斷層地表破裂區域，而SHMA允許建物採用**工程設計減災**。
(An important distinction is that where the AP Act mitigates surface fault rupture hazard by avoidance, the SHMA allows mitigation by engineering design)



國立臺灣大學工程地質實驗室

88

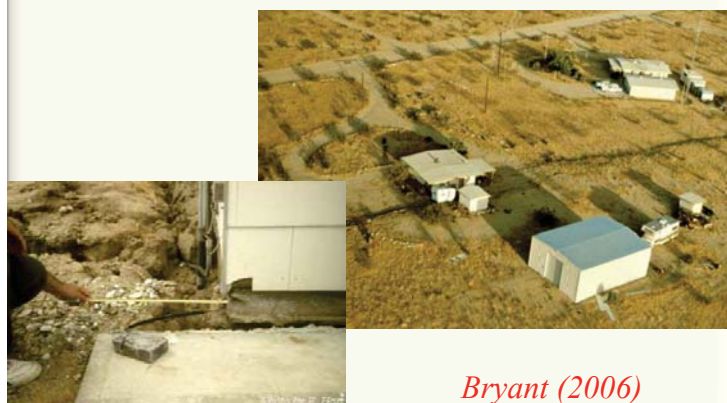
地震災害潛感區域畫設的責任分工 (Seismic Hazards Zoning)



國立臺灣大學工程地質實驗室

89

1992年Landers地震Mw 7.3 所造成之地表破裂災害



Bryant (2006)

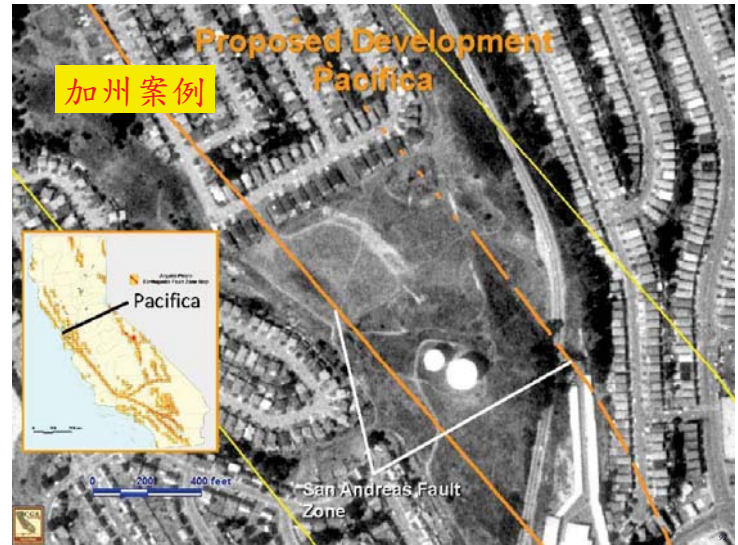


國立臺灣大學工程地質實驗室

90

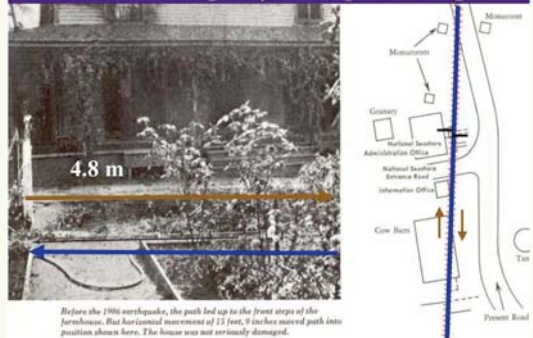
1999年集集地震 (Taiwan)

- 如果集集地震前已有AP法案規範，則生命財產安全的損失將會大大的減少
 (“...if development along the Chelungpu fault had occurred under AP regulations, the loss of life and property would have been greatly reduced.”
 -from Rubin and others, 2001, EOS, v.82, #47)



斷層錯動造成上覆土層變形與地表結構物

1906 Surface Fault Rupture House was undamaged by faulting or shaking



斷層錯動對地下結構物之影響 Bonilla, 1982

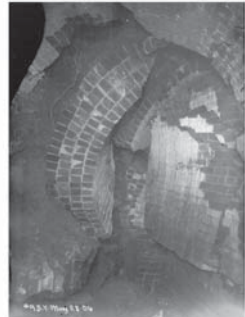


Figure 12. Damage to brick-lined tunnel by about 2 m of right edge on the San Andreas fault, 1906. The tunnel was repaired and restored to use. From Schander (1906, photo 37), courtesy of San Francisco Water Department.



上覆土層變形與地表結構物 名間鐵塔與斷層交會〔大地裂痕，2000〕



斷層錯動對地表與結構物之影響 草屯東山路照片〔大地裂痕，2000〕



車籠埔斷層錯動對地下維生管線變形之影響 (Yasuda et al., 2002)



Photo 2 Damaged gas pipeline at Wu Xi Bridge in Taiwan



Photo 3 Surface fault rupture at damaged site of gas pipeline

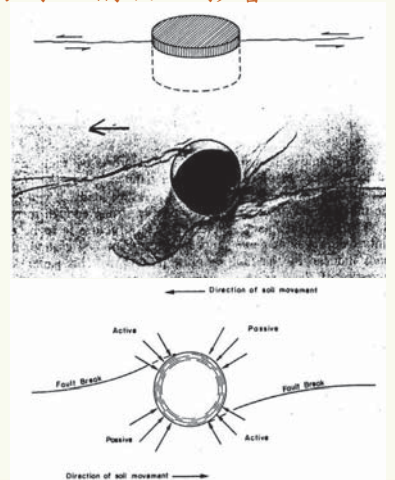


車籠埔斷層錯動產生背衝斷層造成石岡壩引水隧道損壞



斷層錯動對結構物之影響

Duncan (1973)
核電廠



1976年唐山大地震

- $M_s=7.8$
- 死亡人數: 250,000~650,000人
- 地表結構物: 唐山市80%~90%倒塌, 有許多建築物是餘震時倒塌, 地下結構受損相對輕微

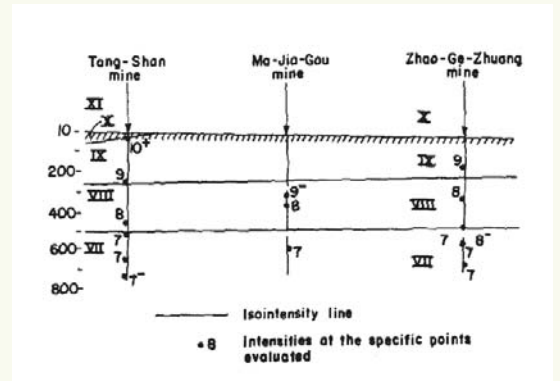


地中結構物是否是大地震來時避難的較佳場所??



1976年唐山大地震

- 地下結構受損相對輕微---地中結構物是否是大地震來時避難的較佳場所??



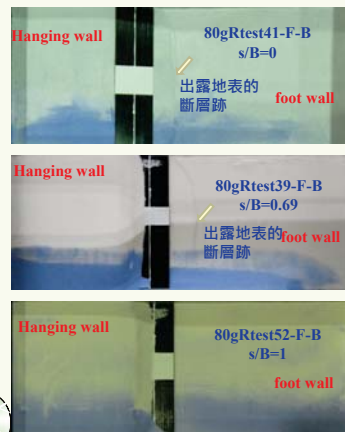
離心機正逆斷層與加上淺基礎的型式



試驗編號	g數	Dr(%)	斷層型式	基礎型式	基礎寬(cm)	基礎厚(cm)	模擬樓層數	s/B
80gNtest35-F-A	80	70	正	A	12.5 (10 m)	0.5 (0.4 m)	3	0.5
80gNtest58-F-B	80	70	正	B	8.06 (6.5 m)	0.89 (0.7 m)	5	1
80gRtest39-F-B	80	70	逆	B	8.06 (6.5 m)	0.89 (0.7 m)	5	0.69
80gRtest41-F-B	80	70	逆	B	8.06 (6.5 m)	0.89 (0.7 m)	5	0
80gRtest52-F-B	80	70	逆	B	8.06 (6.5 m)	0.89 (0.7 m)	5	1
80gRtest47-F-C	80	70	逆	C	8.06 (6.5 m)	1.44 (1.1 m)	9	0.69
40gRtest57-F-D	40	70	逆	D	4.03 (3.25 m)	0.89 (0.7 m)	5	0



基礎座落位置對逆斷層錯動地表變位剖面的影響

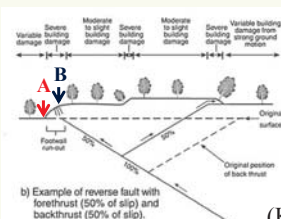


Building failure caused by reverse faulting



車籠埔斷層(逆斷層案例)-土壤結構互制:A保留B重建

豐原市-中正公園附近-破裂前緣

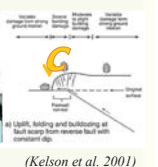


(Kelson et al. 2001)



車籠埔斷層錯動引致地表變形及災後現況

大平市-一江橋附近-建物抬高



(Kelson et al. 2001)

大平市-廊子橋南側-廊子坑路-橫移/逆衝斷裂



(黃文正等人, 2000)



跨活動斷層不同類型結構物因應作為

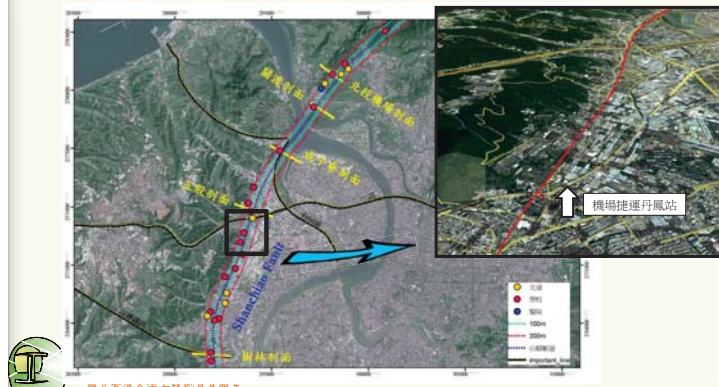
車籠埔斷層

- 國工局在設計國道6號時，路線剛好跨越車籠埔斷層，特別放棄高架，改採土堤方式通過



跨活動斷層不同類型結構物因應作為

山腳斷層沿線經過之重要建物與交通線



跨活動斷層不同類型結構物因應作為

高鐵經過屯子腳斷層

- 屯子腳斷層為1935年新竹臺中烈震所產生，垂直方向最大位移1公尺，最大右移量2公尺
- 斷層跡的不確定性？如何決定保護土堤長度與強度？



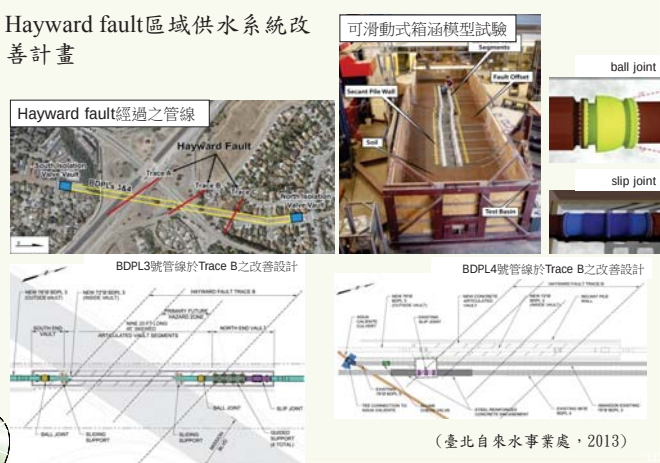
跨活動斷層不同類型結構物因應作為

- Hayward fault經過伯克萊大學校園及其體育場



跨活動斷層不同類型結構物因應作為

- Hayward fault區域供水系統改善計畫



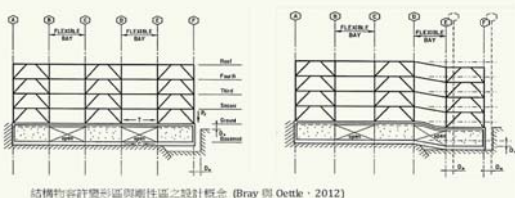
活動斷層災害

1972 Managua earthquake (Cluff, 2002)



以工程方式解決斷層錯動對結構之影響

範例一：Bray與Oettle (2012)指出若可預期活動斷層所造成之變形量、差異沉陷或是角變量及其可能之發生位置等，則可以利用工程方式進行較有彈性之應對方式，如下圖所示，以交錯彈性變形區做為建築物之主要結構設計，當斷層出露位於結構非彈性變形區時，其懸臂端需能自立，以免結構體產生損壞，而當斷層出露位於結構彈性變形區時，則建築物可調整本身之變形，使得整體建築物不致於產生全面性的損壞，並維持其基本功能。



結構物容許變形區與剛性區之設計概念 (Bray 與 Oettle, 2012)

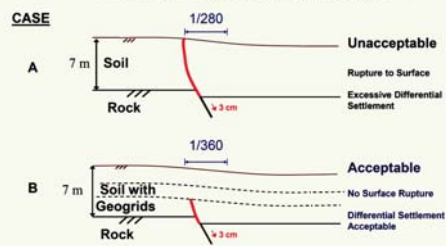


以工程方式解決斷層錯動對結構之影響

範例二：Bray與Oettle (2012)利用數值分析進行加勁土壤對於斷層錯動之地表或地層變形影響，如下圖所示

- 當現地土層無加勁時，其地表變形影響範圍較窄使得差異沉陷或是角變量超出可容許範圍，且其剪裂帶會延伸到地表面
- 當地層內埋入地工格網進行加勁時，在同樣的錯動垂直距離下，其影響範圍變寬，且其角變量或差異沉陷量在容許範圍內，另外發展出之剪裂帶亦受到地工格網之限制而未能發展到地表面

RESULTS OF NUMERICAL ANALYSIS (Bray 2001)



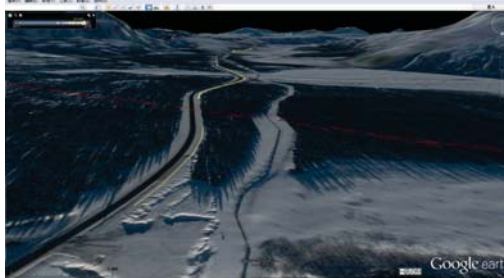
阿拉斯加油管案例
2002，7.9M Denali EQ
1970年代調查規畫設計完工的以工程設計來減災的成功案例

Denali fault

Shift Happens!

(Denali Fault Earthquake Photos 07 Nov 2002)

TRANS-ALASKA
PIPELINE &
Surface Rupture
Map of the 2002
M7.9 Denali Fault
Earthquake, Alaska



結論

- 為了減少斷層錯動時地表變形引發的災害，參考加州案例進行空間的緩衝區(setback)與工程設計的緩衝。
- 利用近域的調查，了解斷層的活動影響範圍，並退縮一定影響範圍以減少破壞及變形。
- 針對調查過後的斷層可能位移量，對建物進行結構強度的提升。
- 透過科學方式減少斷層錯動時引發的災害：
 - 空間的緩衝區。
 - 工程設計的緩衝-上覆土層對地形的影響，尚待進一步科學研究與驗證。



謝誌及參考文獻

- 本文感謝陳文山教授、楊昭男教授、李錫堤教授、盧佳遇教授、劉桓吉博士、Dr. Cluff、亞新工程顧問公司、中興工程顧問公司、國科會研究計畫-94-2211-E-002-042、95-2221-E-002-258、中央地質調查所、以及所有協助實驗研究生同學及前輩的努力
- Bray, J. D. (2001), Developing mitigation measures for the hazards associated with earthquake surface fault rupture. Proceedings of workshop on seismic fault-induced failures, Tokyo, 55-80.
- Chang, Y.Y., Lee, C.J., Huang W.C., Huang, W.J., Lin, M.L., Hung, W.Y., Lin, Y.H. (2013), Use of centrifuge experiments and discrete element analysis to model the reverse fault slip. International Journal of Civil Engineering, Transaction B: Geotechnical Engineering, Vol. 11, No.2, pp.79-88.
- Cole D. A. and Lade, P. V. (1984), Influence zones in alluvium over dip-slip faults. *Journal of geotechnical engineering* 110, 599-615.
- Kelson, K. I., Kang, K. H., Page, W. D., Lee, C. T. and Cluff, L. S. (2001), Representative styles of deformation along the Chelungpu Fault from the 1999 Chi-Chi (Taiwan) earthquake: Geomorphic characteristics and responses of man-made structures. *Bulletin seismological society america* 91(5), 930-952.

