

潛移行爲活動斷層地震潛勢評估方法-以池上斷層爲例

李易叡¹、鄭錦桐¹、胡植慶²、李建成³、賴慈華⁴

1財團法人中興工程顧問社

2國立台灣大學地質科學系

3中央研究院地球科學研究所

4中央地質調查所構造與地震地質組

摘要

活動斷層地震潛勢評估的目的，除了要了解活動斷層可能引發之最大地震規模，並且評估斷層未來發生大地震之機率。斷層可能引發之最大地震規模可藉由斷層長度或是斷層面積以尺度經驗公式推估；斷層未來發震之機率，則需了解斷層發生大規模地震之週期，以及最後一次發生地震的時間，才能以合適之統計模式評估活動斷層未來一段時間內之發震機率。地震重複之週期，一般可根據Wallace (1970)的公式來推求之： $RI = D/(S-C)$ 。式中，RI是平均重複間隔；D是單一且典型的斷層活動滑移(錯動)；S是與大規模歷史地震活動有關的斷層滑移速率；C是潛移速率(creep slip rate)。許多斷層常無潛移實際資料，一般假設C爲零，所以地震重複間隔可簡示爲 $RI = D/S$ ，亦即滑移速率 $S = D/RI$ 。本研究則是蒐集斷層滑移速率及幾何面面積參數，以特徵地震模式評估斷層之再現週期。

池上斷層位於台東縱谷之中南段，長約65公里，爲菲律賓海板塊碰撞歐亞大陸板塊形成的構造縫合帶斷層，斷層機制爲逆移兼具左移分量，2003年 $M_w = 6.8$ 成功地震之餘震重定位 (Kuochen et al., 2007)，由縱谷東邊的餘震序列分佈可以看出有一明顯的地震帶沿著傾角向東的斷層面分佈，深度可達地下25公里處，可作爲池上斷層幾何形貌之參考。根據GPS在1992-1999年之測量結果，池上斷層滑移速率約31 mm/yr (Yu and Kuo, 2001)。安朔葉等 (Angelier et al., 1997) 的監測結果顯示，池上斷層會以潛移的方式活動，在大坡、錦園、萬安一帶平均每年1.9-2.7公分的位移量，李建成等 (Lee et al., 2006) 計算池上斷層的潛移速率約20-30 mm/yr。

在評估池上斷層之地震潛勢之前，需考慮池上斷層的分段及斷層潛移的特性，池上斷層的分段根據1951年及2003年兩次歷史地震的地表破裂記錄 (鍾令和, 2003; Chen et al., 2008)，可分爲南北兩段，以尺度經驗公式推估整段破裂的地震矩規模 $M_w 7.1 \sim 7.4$ ，北段及南段的地震矩規模均爲 $M_w 6.7 \sim 7.1$ 。將2003年地表同震變形之速度場反演於池上斷層面上，可得到斷層面上之平均同震變位量 (Wu et al., 2006; Ching et al. 2007; Hu et al. 2007; Cheng et al., 2009; Hsu et al., 2009)，本研究假設2003年成功地震之平均同震變位量爲自1951年來所累積之斷層面滑移虧損，以此計算池上斷層之滑移虧損率落在5.8~10 mm/yr之間，用來取代長期滑移速率，可以有效排除潛移速率之影響。

本研究以特徵地震模式計算池上斷層在整段週期為43~211年；北段週期為22~152年；南段週期為21~147年。在獲得各事件之再現週期後，還需要最後一次地震發生之時間，才能以統計模式估算池上斷層未來30、50及100年的發生機率，池上斷層整段最後一次發生時間為西元1951年，北段為西元1951年，南段為西元2003年。使用BPT模式評估池上斷層各事件之發生機率，得到池上斷層未來30年、50年及100年之機率為36.3%、46.3%及61.5%。

潛移行為活動斷層地震潛勢 評估方法-以池上斷層為例

李易叡¹ 鄭錦桐¹ 胡植慶² 李建成³ 賴慈華⁴

¹財團法人中興工程顧問社

²國立台灣大學地質科學系

³中央研究院地球科學研究所

⁴中央地質調查所構造與地震地質組

報告人：李易叡

財團法人中興工程顧問社

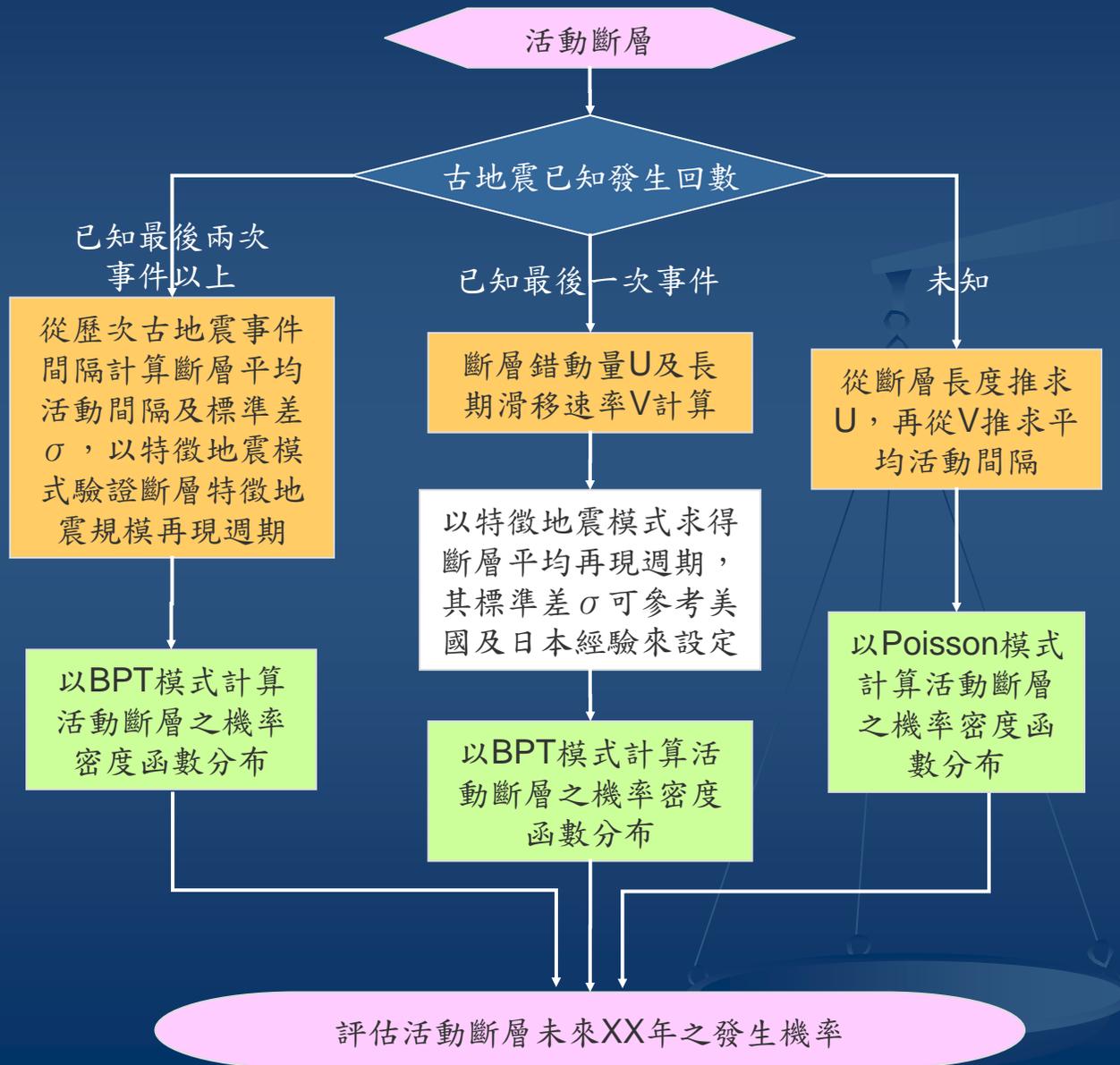
102年5月15日

報告大綱

- 活動斷層地震潛勢評估流程說明
- 潛移活動斷層地震潛勢評估-池上斷層

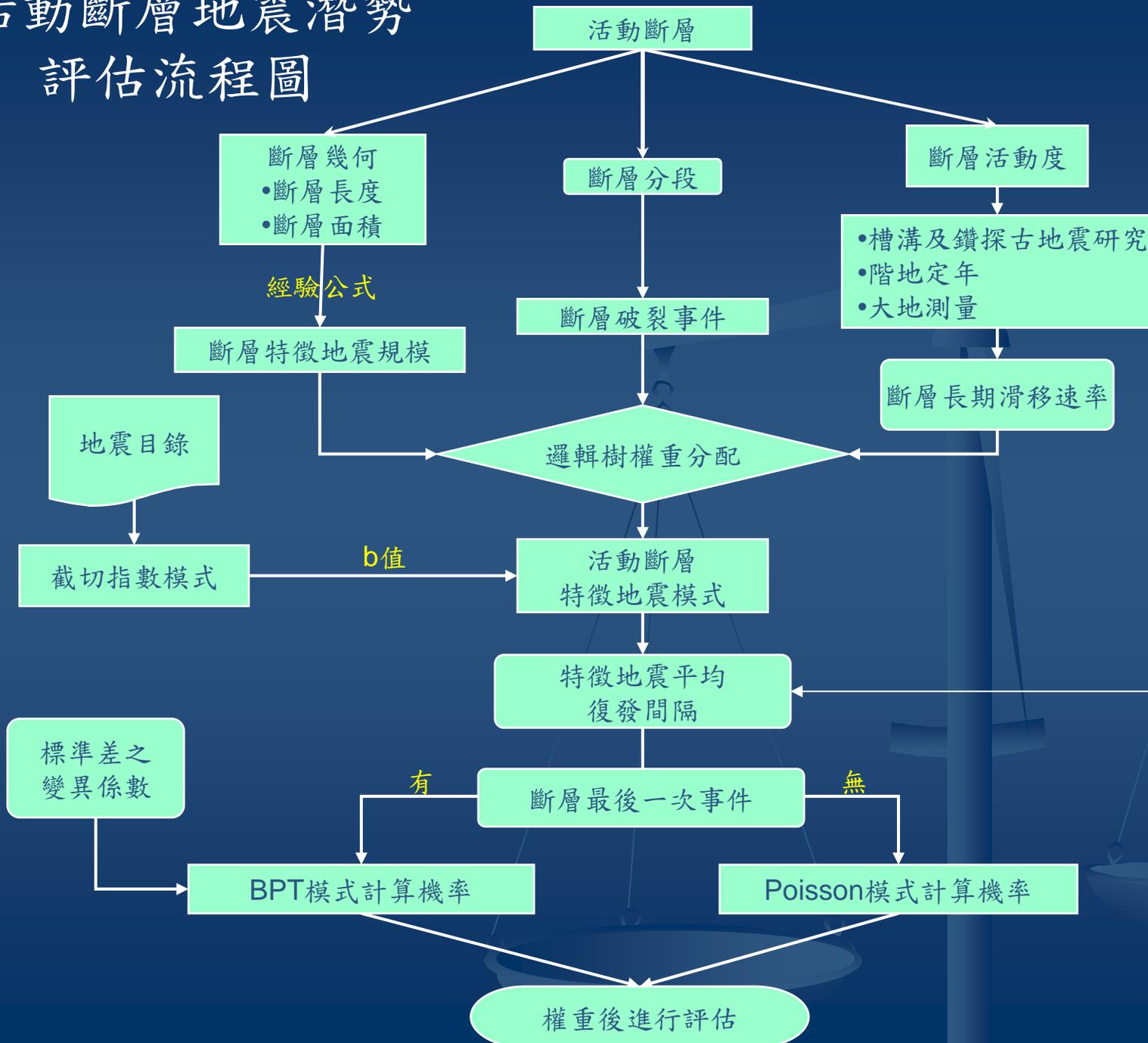


活動斷層地震潛勢評估概念

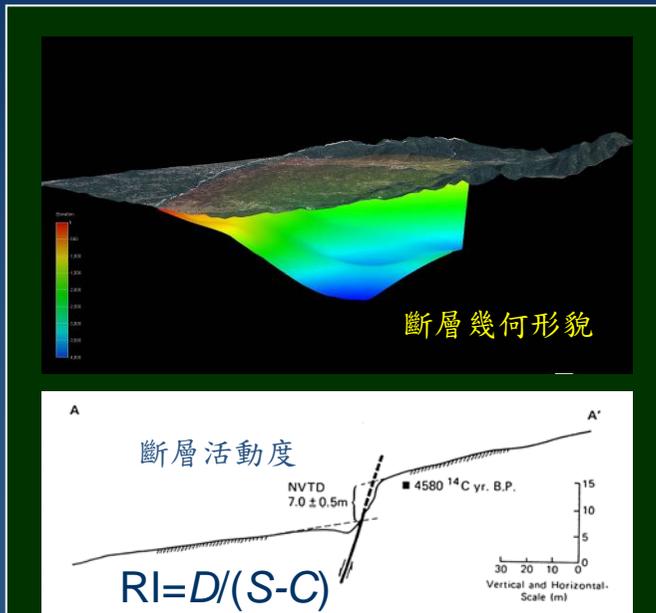


U :活動斷層一次滑移錯動量
 V :長期滑移速率

活動斷層地震潛勢 評估流程圖

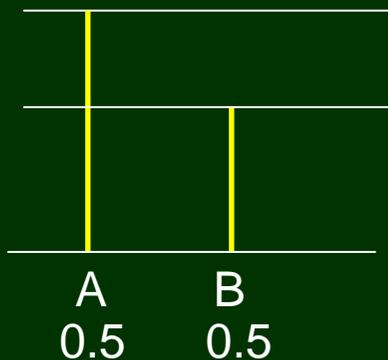


活動斷層地震潛勢評估示意圖

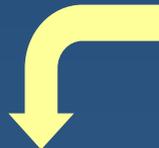


- RI: 地震平均重複間隔
 D: 單一且典型斷層活動錯移
 S: 與大規模歷史地震活動有關的滑移速率
 C: 潛移速率 (Creep slip rate)。

斷層破裂事件評估

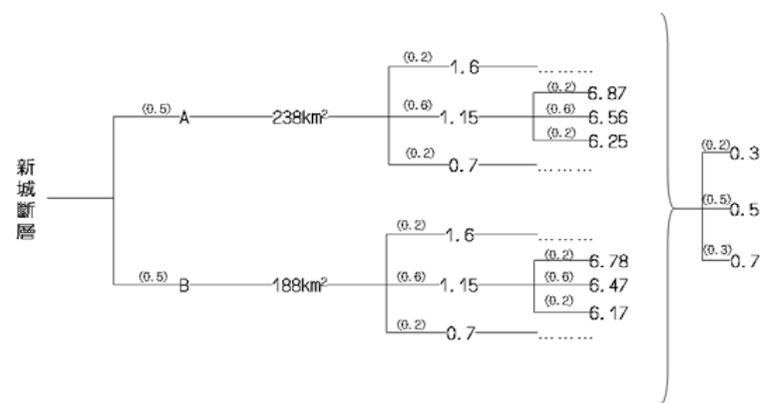


Uncertainty

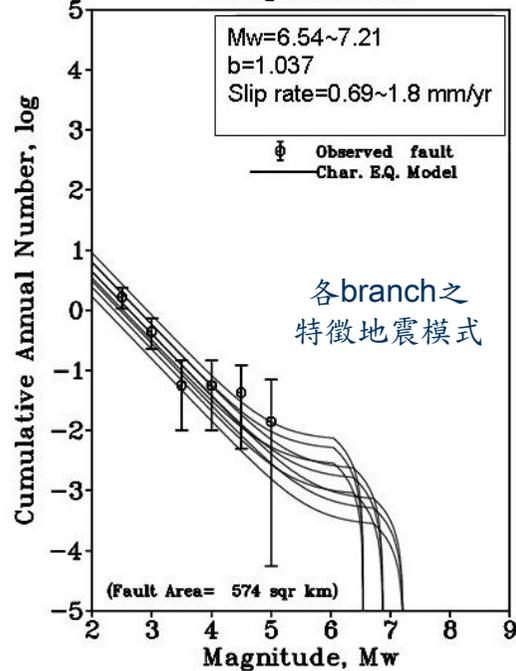


新城斷層邏輯樹

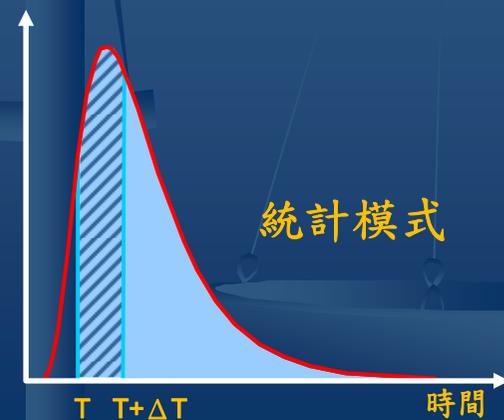
| 斷層名稱 | 斷層分段 | 斷層面積 (km ²) | 斷層滑移速率 (mm/yr) | 特徵地震規模 (M _w) | BPT model 變異係數 |
|------|------|-------------------------|----------------|--------------------------|----------------|
|------|------|-------------------------|----------------|--------------------------|----------------|



Shangchiao fault



機率密度



邏輯樹權重分配

池上斷層地震潛勢評估

The background of the slide is a dark blue gradient. In the center, there is a faint, light blue illustration of a scale of justice. The scale has a vertical pillar in the middle, with two pans hanging from a horizontal beam. The pans are empty and positioned at different heights, suggesting an imbalance or a process of weighing. The overall aesthetic is professional and academic.

大綱

◆ 參數蒐集

- ▶ 位置與長度
- ▶ 分段破裂模式
- ▶ 斷層面幾何
- ▶ 長期滑移速率
- ▶ 特徵地震規模
- ▶ 歷史地震及古地震事件
- ▶ 單一事件變位量
- ▶ 活動斷層參數表

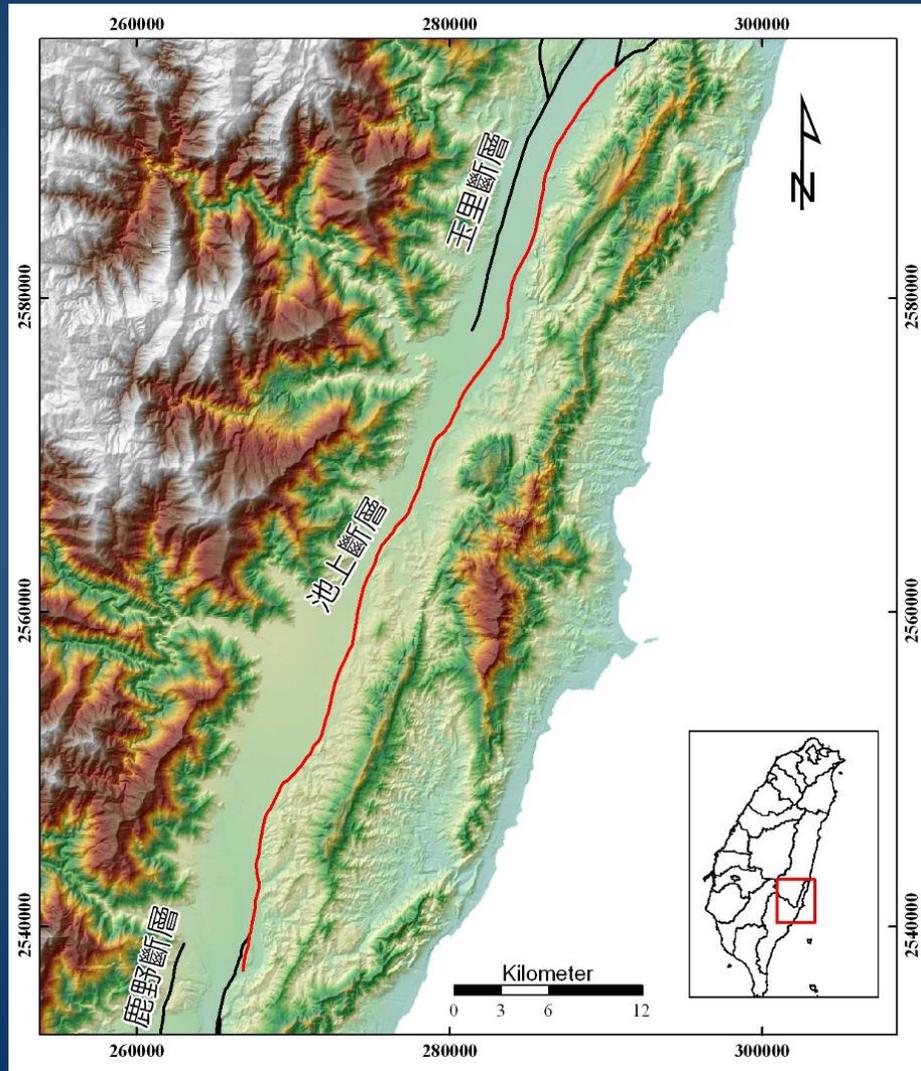
◆ 邏輯樹

◆ 特徵地震模式

◆ 發生機率評估



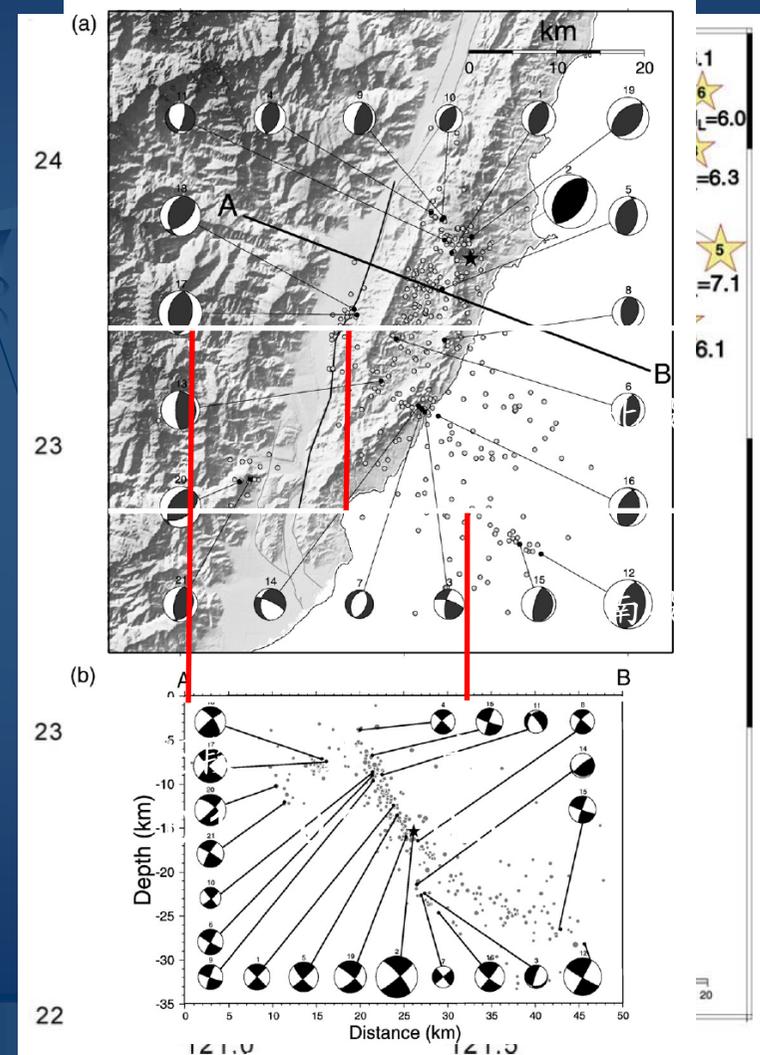
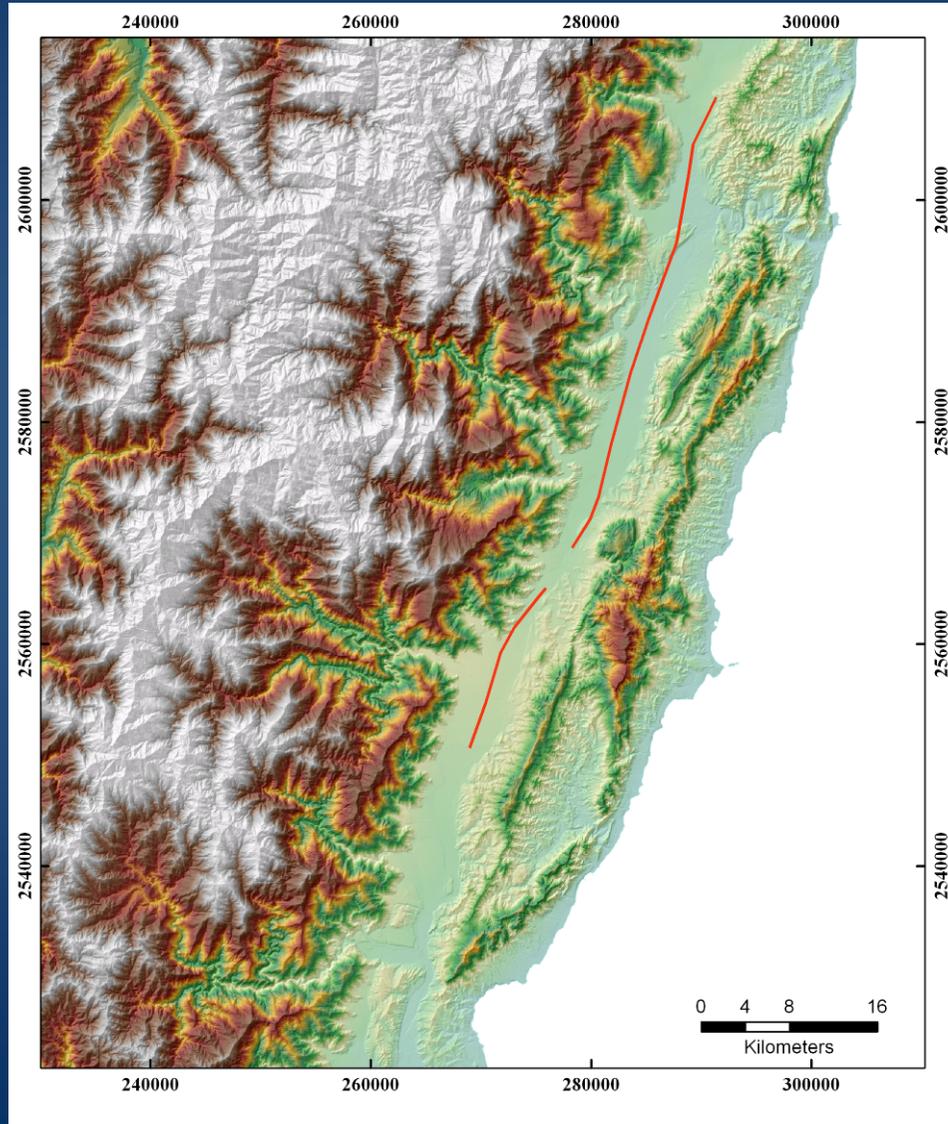
池上斷層-位置與長度



- 位於台東縱谷之中南段，長約65公里。
- 由花蓮縣玉里鎮春日里經台東縣池上鄉萬安，再向南延伸至鹿野鄉瑞隆村。

池上斷層-分段破裂模式

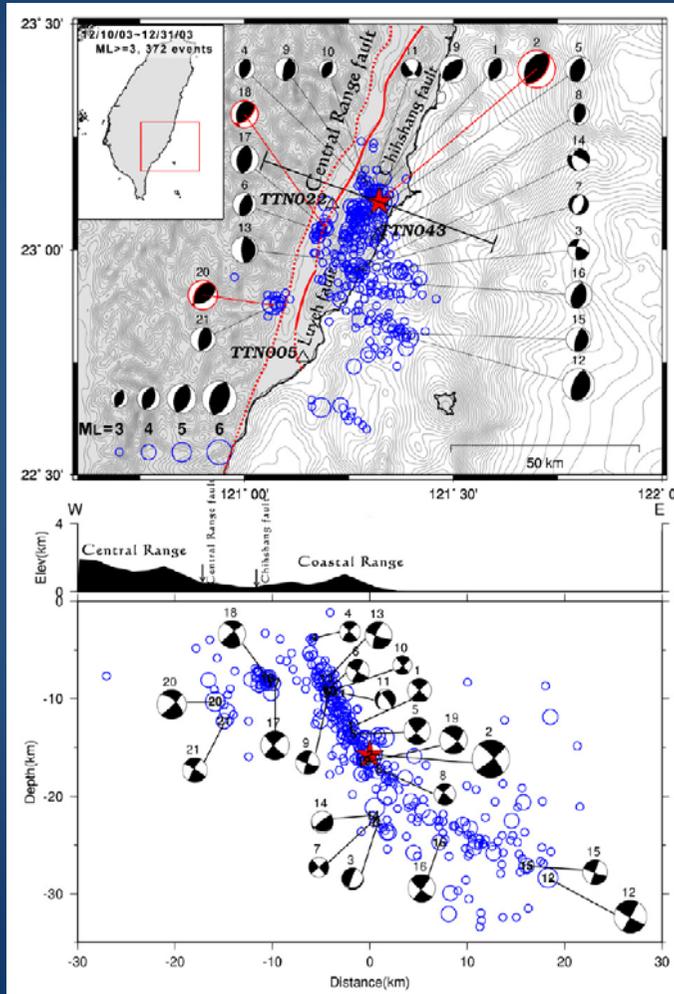
1951年花蓮2003年集集大地震之震源時空分布



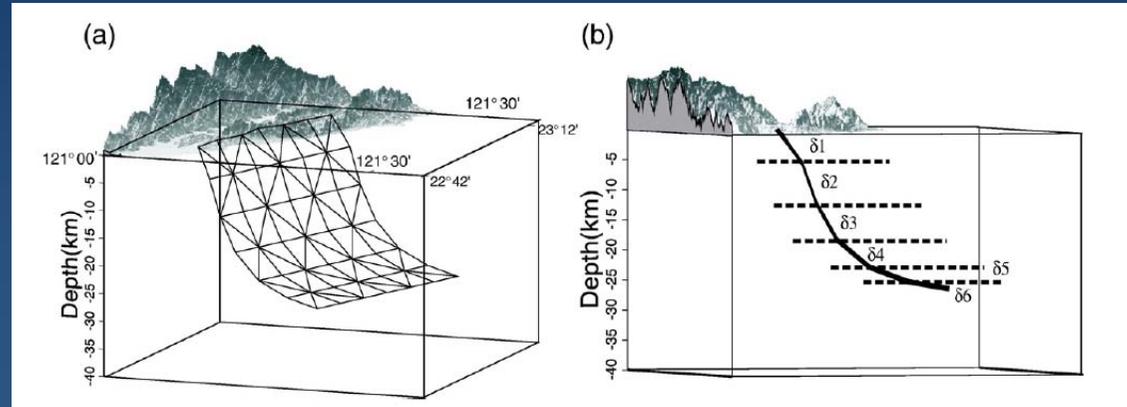
Kuoehen et al., 2007
Chen et al., 2008

池上斷層-斷層面幾何

2003年成功地震



(摘自 Kuochen et al., 2007)



The geometry of delineation of the aftershocks

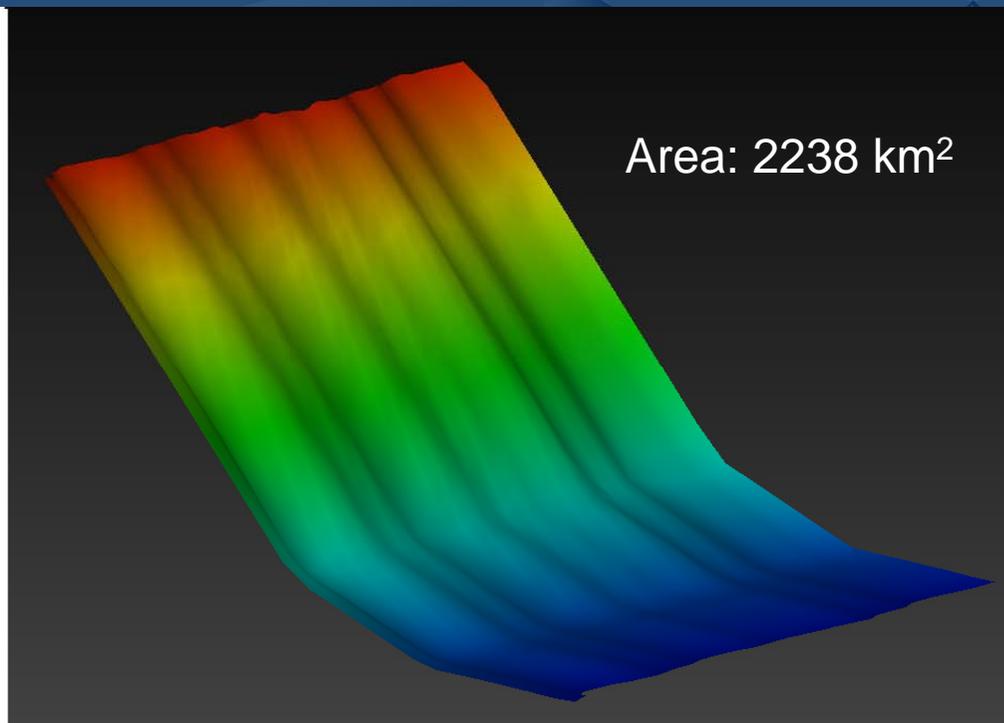
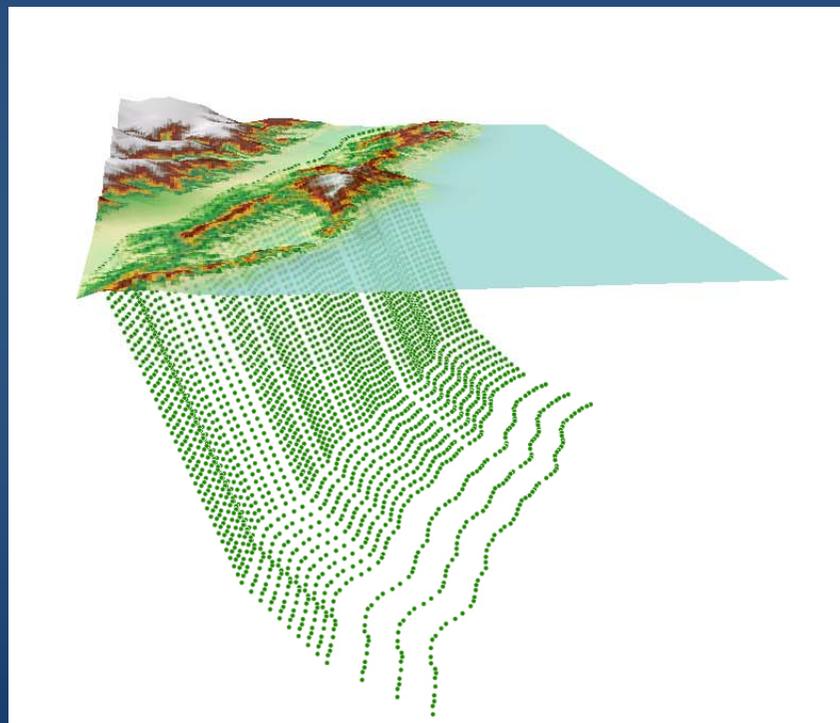
| | Segment 1 (δ_1) | Segment 2 (δ_2) | Segment 3 (δ_3) | Segment 4 (δ_4) | Segment 5 (δ_5) | Segment 6 (δ_6) |
|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Optimal dip angle | 60° | 65° | 60° | 40° | 20° | 10° |
| The range of depth (km) | 0~6.1 | 6.1~12.4 | 12.4~18.5 | 18.5~23.0 | 23.0~25.4 | 25.4~26.6 |

(摘自 Cheng et al., 2009)

- 參考Cheng et al., 2009設定傾角。

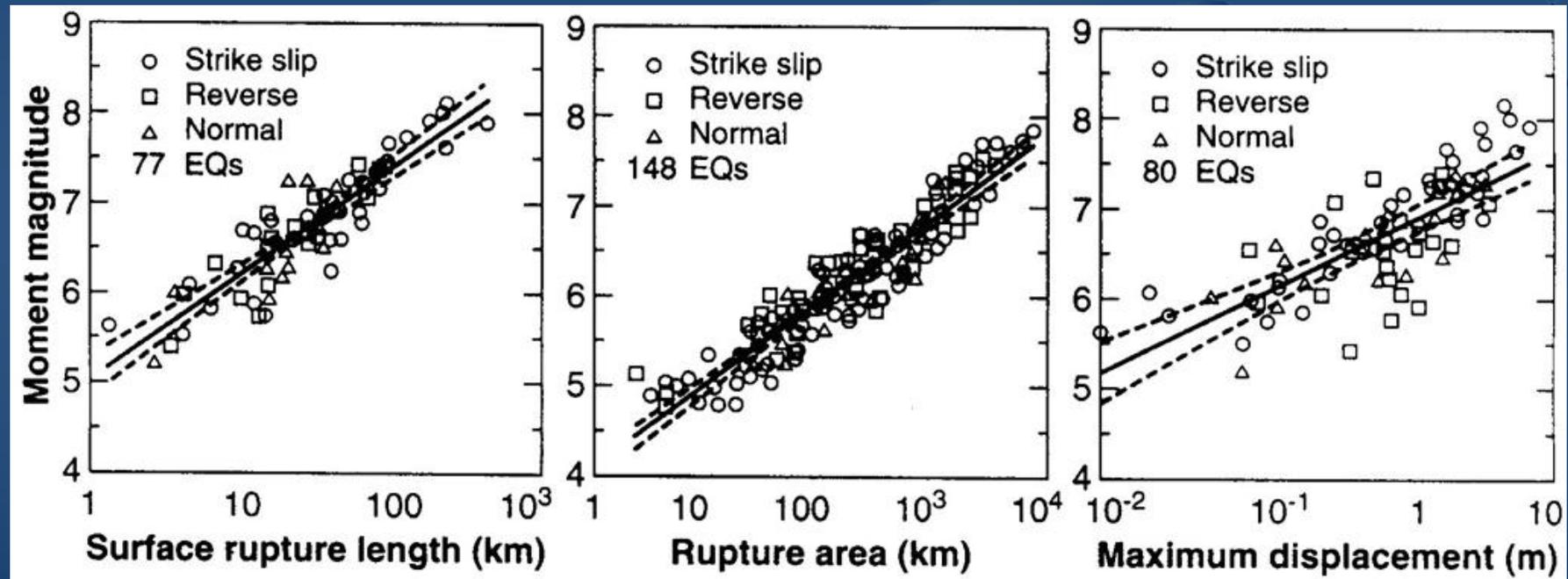
| | | | |
|--------|--------|---------|---------|
| 深度(km) | 0-18.5 | 18.5-23 | 23-25.4 |
| 傾角(度) | 65 | 40 | 20 |

池上斷層-斷層面幾何



斷層參數尺度關係

Wells and Coppersmith (1994) 彙整並建置包含244個地震的資料庫，利用此資料庫中的資料，回歸分析出各型態的斷層性質（如走向、正、逆斷層）對地震規模、斷層長、斷層寬、斷層面積、地表位移之間的關係式。

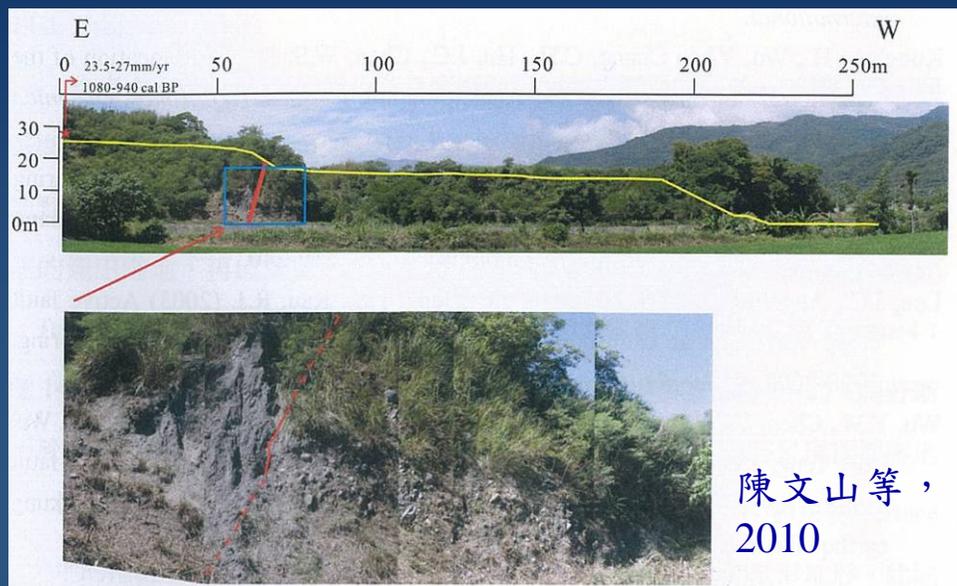


(Wells and Coppersmith, 1994)

池上斷層-特徵地震規模

| 斷層尺度參數 | 地震矩規模 Mw | 經驗式 | 參考文獻 |
|-----------------------|-------------|--|-----------------------------|
| 面積2238km ² | 7.3 | $M_w = 4.33 + 0.9 \log A \quad \sigma = 0.25$ | Wells and Coppersmith, 1994 |
| 面積2238km ² | 7.4 | $M_w = (0.82 \pm 0.071) \log (A) + (4.61 \pm 0.141)$ | 吳相儀, 2000 |
| 長度65公里 | 7.1 | $\log (L_e) = (1/2) \log (M_0) - 8.08$ | Yen and Ma, 2011 |
| | | $M_w = (\log (M_0) - 9.1) / 1.5$ | Kanamori, 1977 |

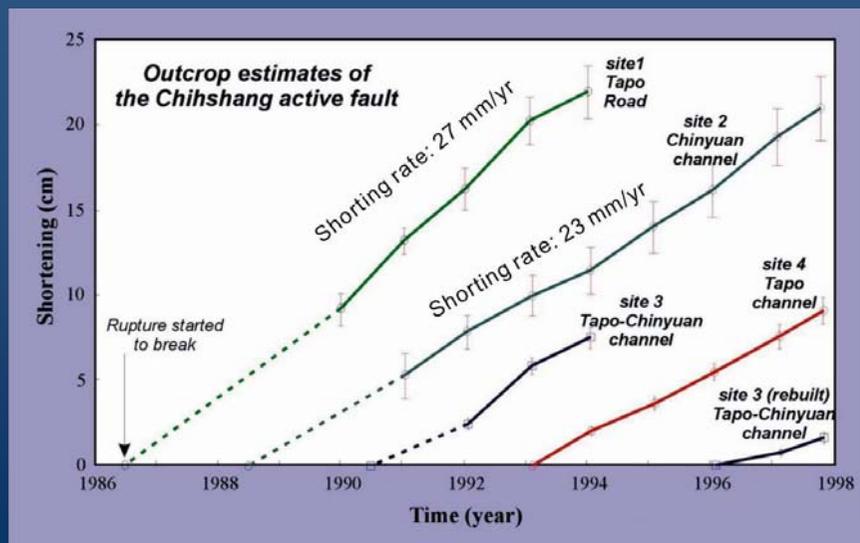
池上斷層-長期滑移速率



- 陳文山等 (2010) 研究鯨溪富池橋南岸之池上斷層露頭剖面，斷層面淨滑移速率為**26-30 mm/yr**，可算是相當活躍。

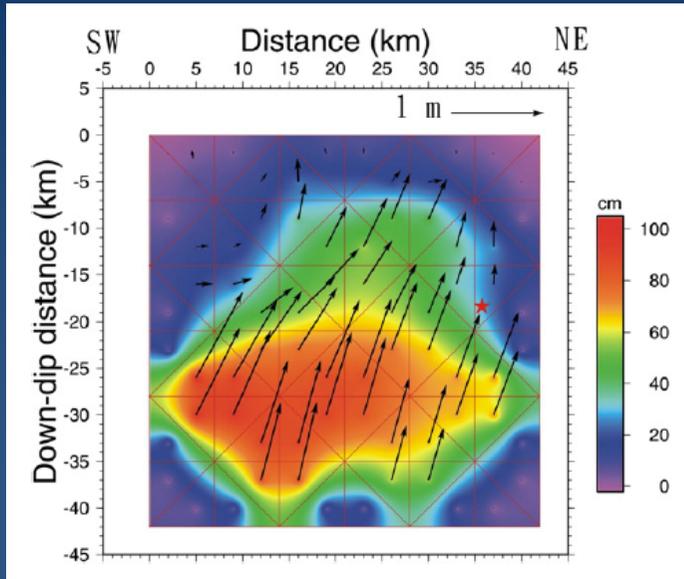
- 安朔葉等 (Angelier et al., 1997) 的監測結果顯示，池上斷層會以**潛移**的方式活動，在大坡、錦園、萬安一帶平均每年**1.9-2.7公分**的位移量

- 李建成等 (Lee et al., 2006) 計算池上斷層的潛移速率約**20-30 mm/yr**。



(引自 Angelier et al., 2000)

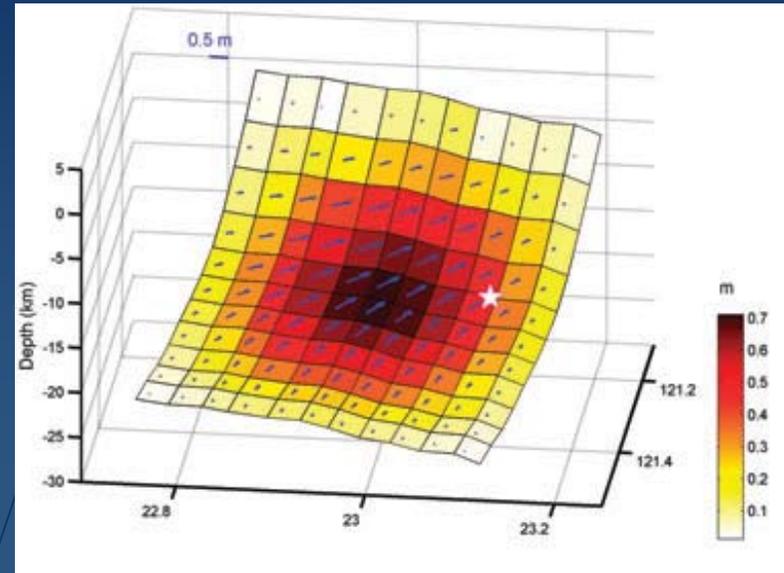
池上斷層-斷層面滑移速率



模擬2003年成功地震同震時斷層面之滑移量分布。平均滑移量為52公分[Cheng et al., 2009]

2003年成功地震其他研究之斷層面逆推結果:

- 44公分(Ching et al. 2007)
- 48公分(Hu et al. 2007)
- 34公分(Hu et al. ,2007)
- 39公分(Wu et al. ,2006)



模擬2003年成功地震同震時斷層面之滑移量分布。平均滑移量為30公分[Hsu et al. ,2009]

Slip rate= 斷層面平均滑移量/(2003-1951)

- 10 mm/yr (Cheng et al., 2009)
- 9.2 mm/yr (Hu et al. 2007)
- 8.5 mm/yr (Ching et al. 2007)
- 7.5 mm/yr (Wu et al. ,2006)
- 6.5 mm/yr (Hu et al. ,2007)
- 5.8 mm/yr (Hsu et al. ,2009)

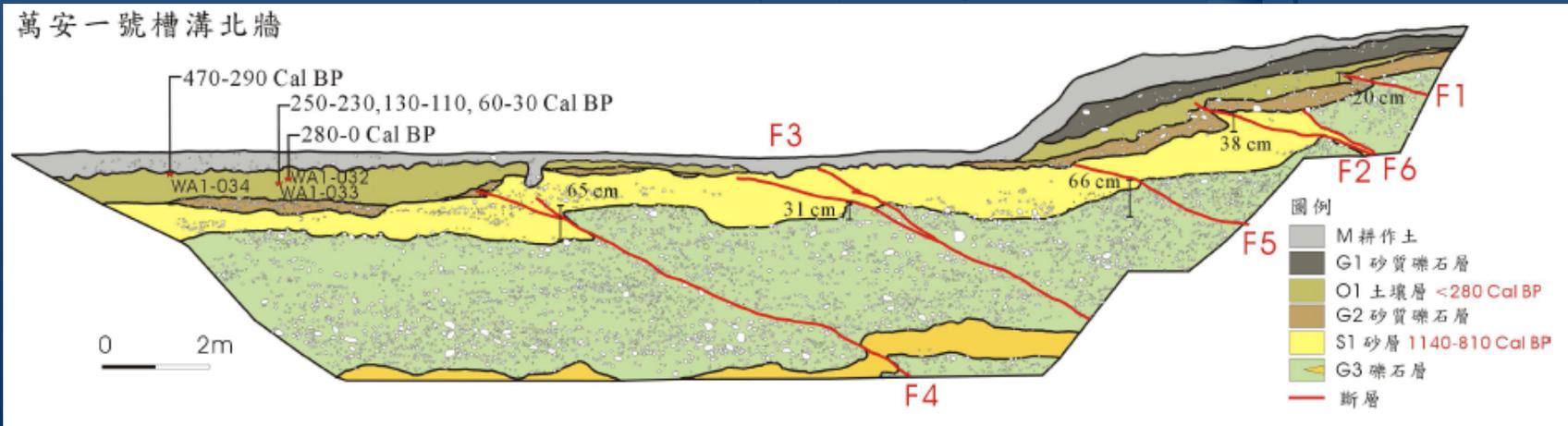
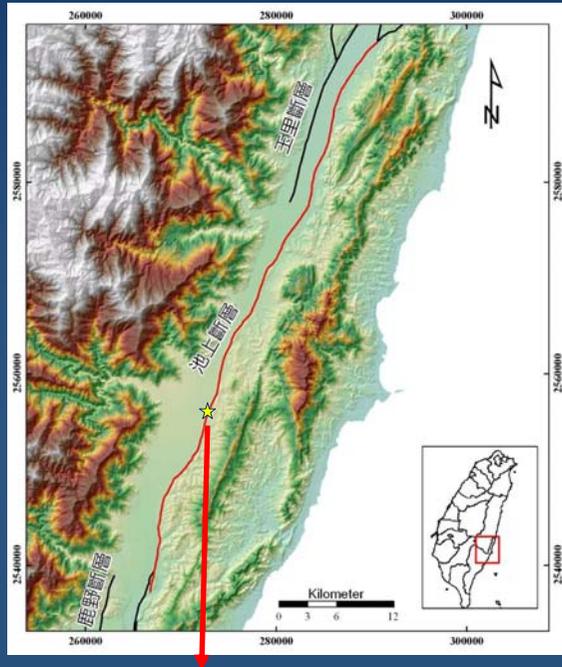


池上斷層-歷史地震

- 1951年11月25日的台灣東部的強震，徐鐵良（Hsu, 1962）認為池上斷層為1951年的地震斷層，鄭世楠等（Cheng et al., 1996）對地震重新定位，規模為 $M_s=6.8$
- 2003年12月10日之成功地震規模為 $M_w=6.8$ ，李建成等（Lee et al., 2006）認為該次地震是屬於池上斷層之破裂造成。
- 陳文山等（2008）在池上斷層進行槽溝之古地震研究，初步結果顯示1000年以來發現至少有8次古地震事件。

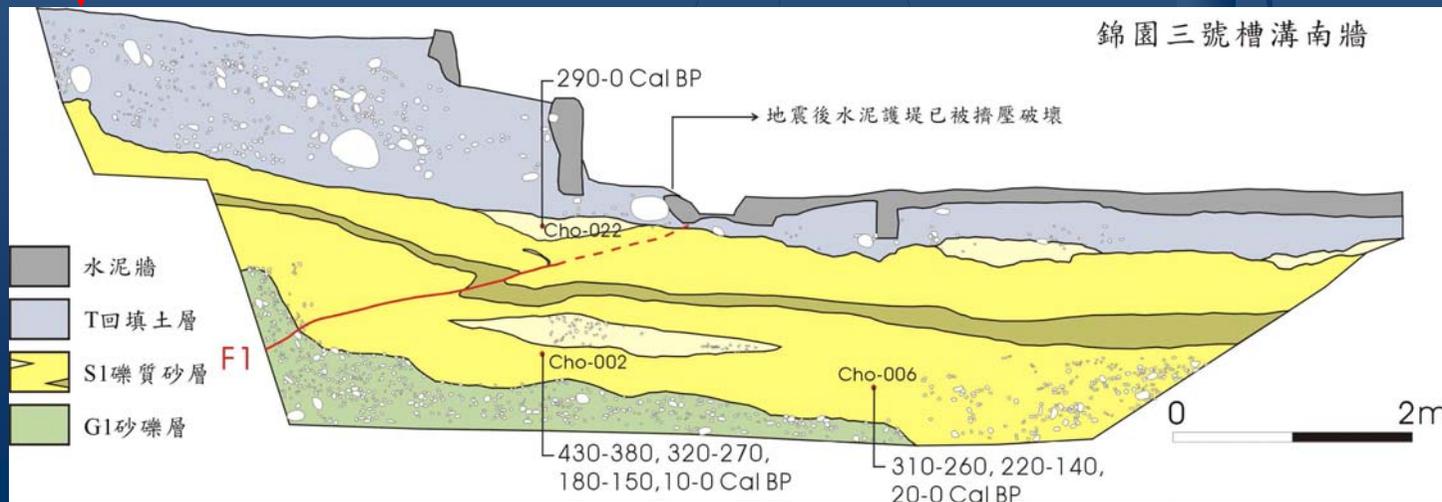
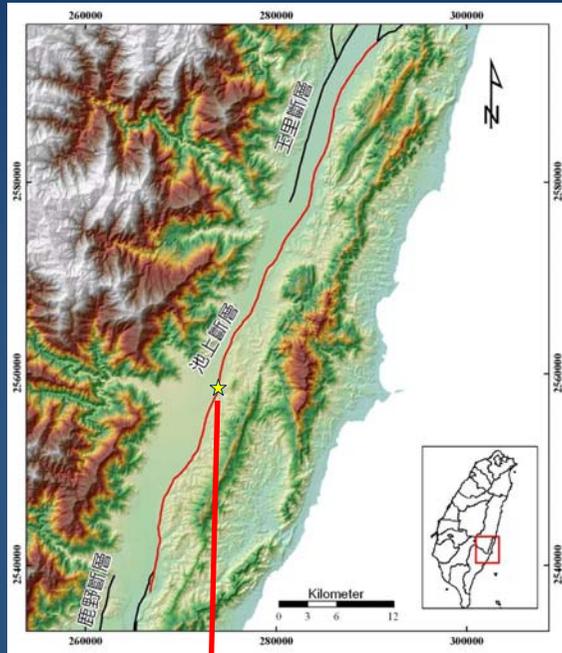
單一事件變位

- 池上鄉錦園村的萬安一號槽溝北牆，斷層的垂直錯移量各為 20 公分、38公分、31 公分、65 公分、66 公分



單一事件變位

- 錦園三號槽溝，2003 年成功地震造成地表垂直錯移量約 10 公分。



池上斷層參數表

| | 斷層參數 | 斷層參數數據 | 研究方法 | 參考文獻 |
|----------------|-----------------------------|--|--|-----------------------|
| 池上 斷層 | 斷層分支 | NA | | |
| | 長度(km) | 65 | 由花蓮縣玉里鎮春日里向南南西方向經台東縣池上鄉萬安，再向南延伸至鹿野鄉瑞隆村 | 林啟文等，2009 |
| | 寬度(km) | 34.4 | 本計畫建置之斷層面模型 | 參考 Cheng et al., 2009 |
| | 深度 (km) | 25.4 | 2003年成功地震地震系列分佈圖 | Kuochen et al., 2007 |
| | 面積(km ²) | 2238 | 本計畫建置之斷層面 | 參考 Cheng et al., 2009 |
| | 走向 | 北北東 | 地表地質調查 | 林啟文等，2007 |
| | 傾斜角度(度) | 0~18.5公里：65度 18.5~23公里：40度 23~25.4公里：20度 | 本計畫建置之斷層面 | 參考 Cheng et al., 2009 |
| | 斷層機制 | 略具左移分量逆斷層 | 鑽井、地物探勘及地表地質調查 | 林啟文等，2007 |
| | 短期滑移速率 (mm/yr) | 19-27 | 地表破裂變形釘網測量 | Angelier et al., 1997 |
| | | 31 | 1992-1999 GPS速度場 | Yu and Kuo, 2000 |
| | | 20-30 | 地表破裂變形潛變儀測量 | Lee et al., 2006 |
| | 長期滑移速率 (mm/yr) | 26-30 | 量測鯉溪富池橋南岸之池上斷層露頭剖 面河階比高並進行碳14定年 | 陳文山等，2010 |
| | 滑移赤字 | 5.8 – 10 mm/yr | | |
| 單一事件變位量 (m) | 0.1 | 錦園3號槽溝，2003年成功地震錯移 | 陳文山等，2008 | |
| | 0.2、0.38、0.31、 0.65、0.66 | 萬安1號槽溝，5次古地震事件錯移 | | |

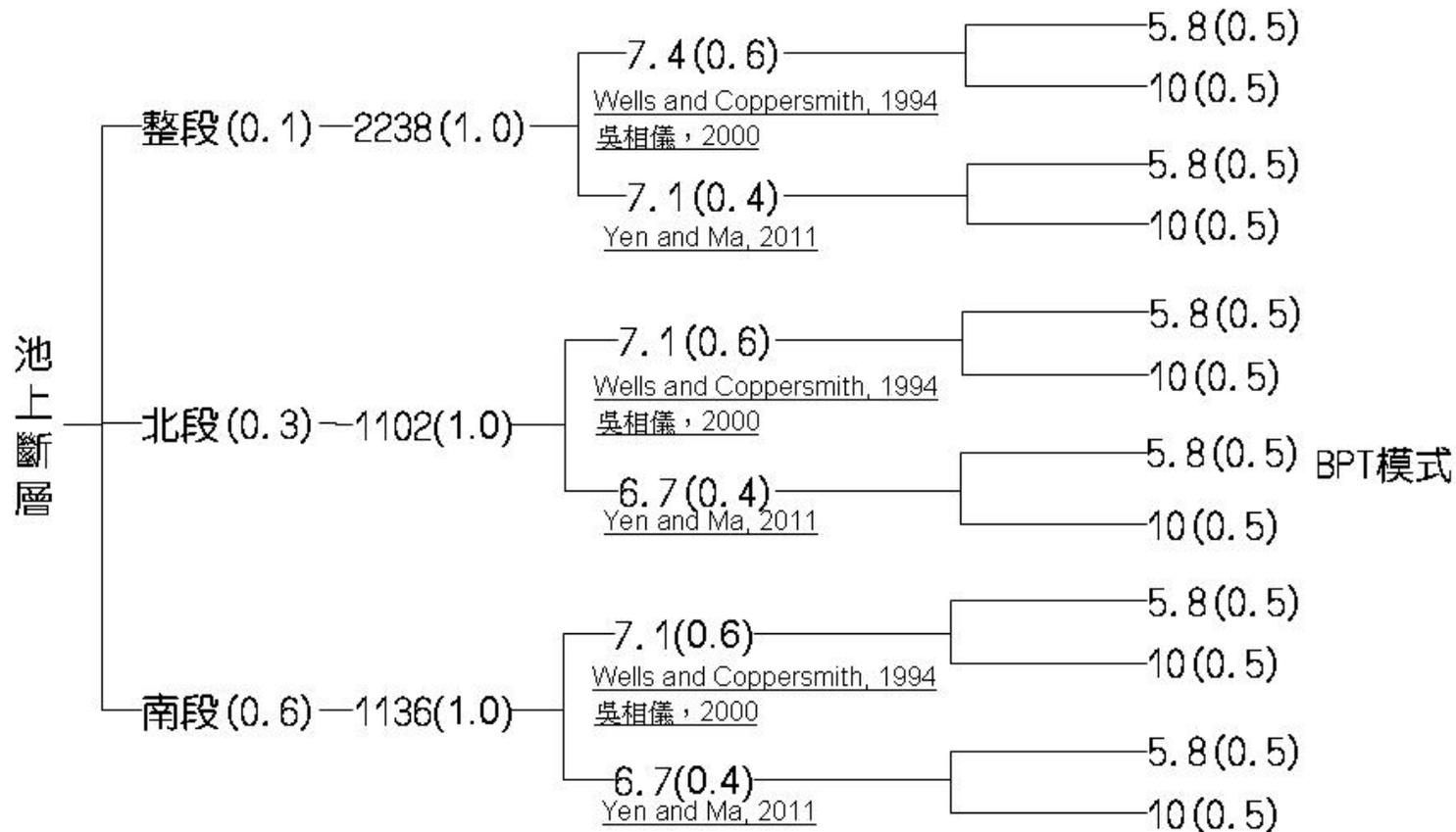
池上斷層參數表

| 斷層參數 | 斷層參數數據 | 研究方法 | 參考文獻 |
|--------------|------------|---|--|
| 最大可能地震規模(Mw) | 7.3 | $M_w = 4.33 + 0.90 \log A$ (逆斷層) | <i>Wells and Coppersmith, 1994</i> |
| | 7.4 | $M_w = (0.82 \pm 0.071) \log(A) + (4.61 \pm 0.141)$ | 吳相儀, 2000 |
| | 7.1 | $\log(L_e) = (1/2) \log(M_0) - 8.08$ $M_w = (\log(M_0) - 9.1) / 1.5$ | <i>Yen and Ma, 2011</i> <i>Kanamori, 1977</i> |
| 地震重複週期(年) | | | |
| 最近一次活動時間 | 1951年Ms6.8 | 歷史地震 | |
| | 2003年Mw6.8 | | |

池上斷層-邏輯樹

池上斷層邏輯樹

| 斷層名稱 | 斷層破裂事件 | 斷層面積 (km ²) | 特徵地震規模(M _w) | 斷層滑移速率 (mm/yr) | 統計模式 |
|------|--------|-------------------------|-------------------------|----------------|------|
|------|--------|-------------------------|-------------------------|----------------|------|

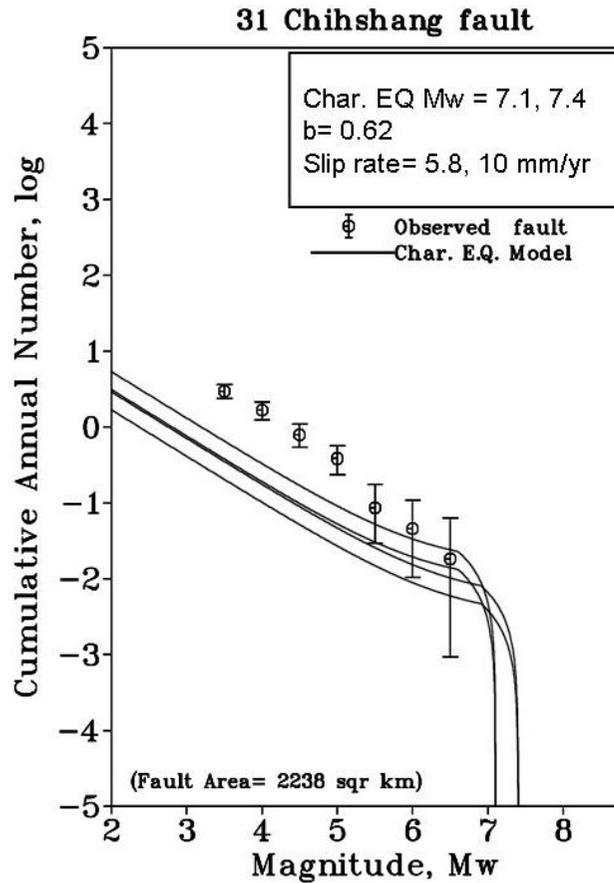


池上斷層-特徵地震模式

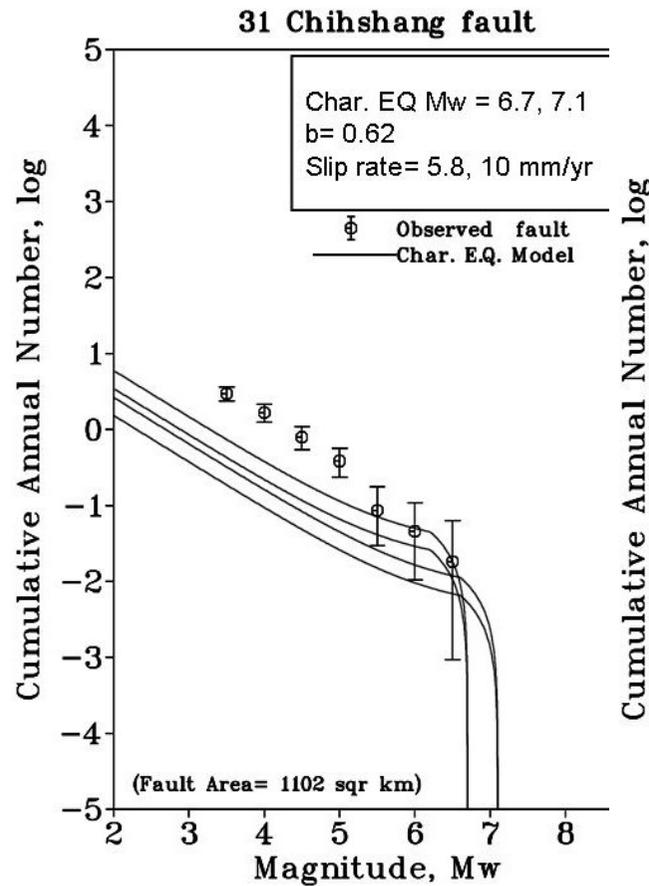
整段

北段

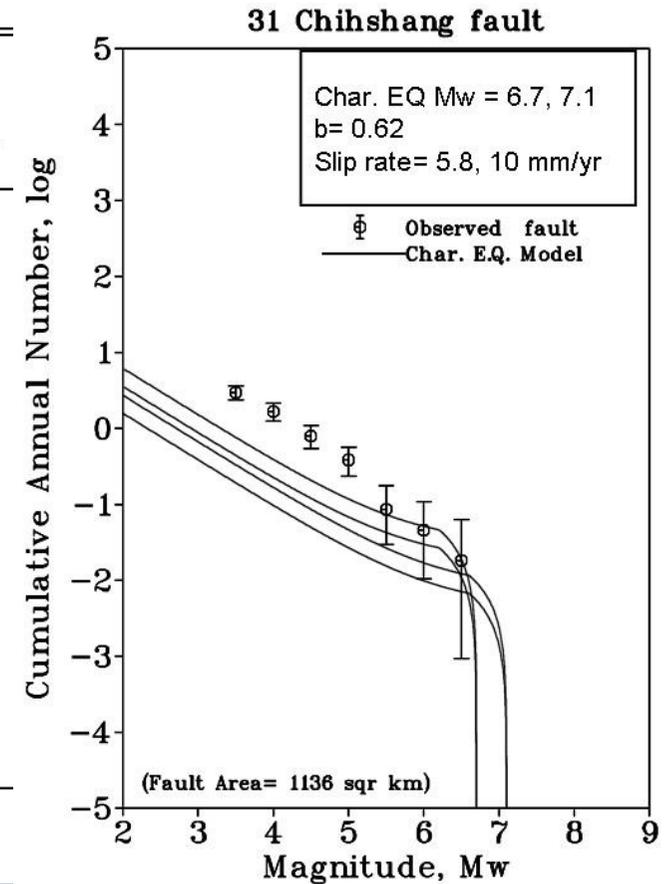
南段



211(0.03)、122(0.03)、
75(0.02)、43(0.02)



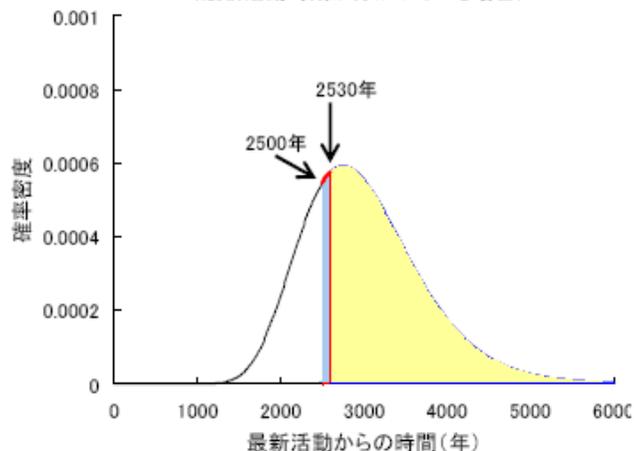
152(0.09)、88(0.09)、
38(0.06)、22(0.06)



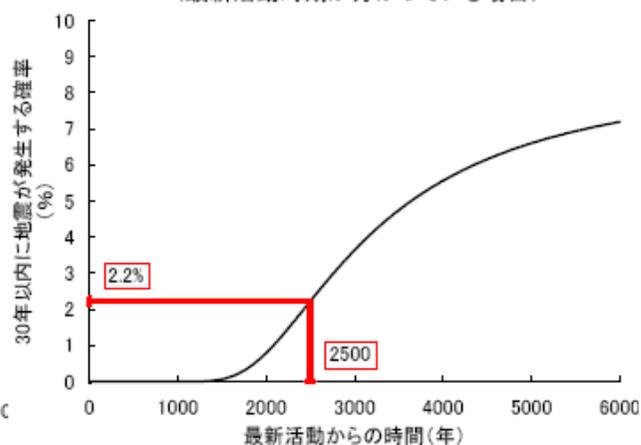
147(0.18)、86(0.18)、
37(0.12)、21(0.12)

機率密度函數選擇

30年以内に地震が発生する確率の計算方法
(最新活動時期が分かっている場合)



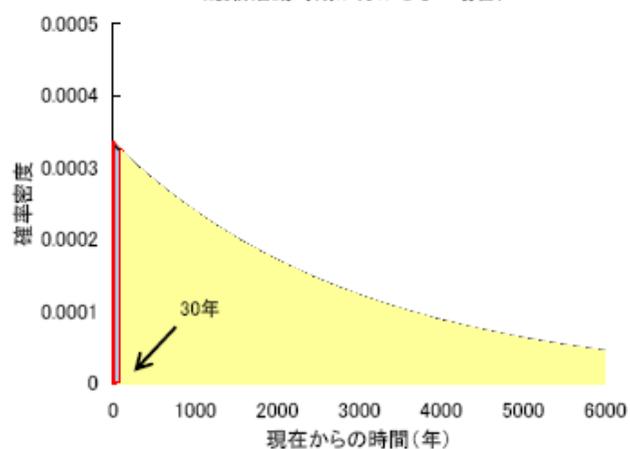
30年以内に地震が発生する確率
(最新活動時期が分かっている場合)



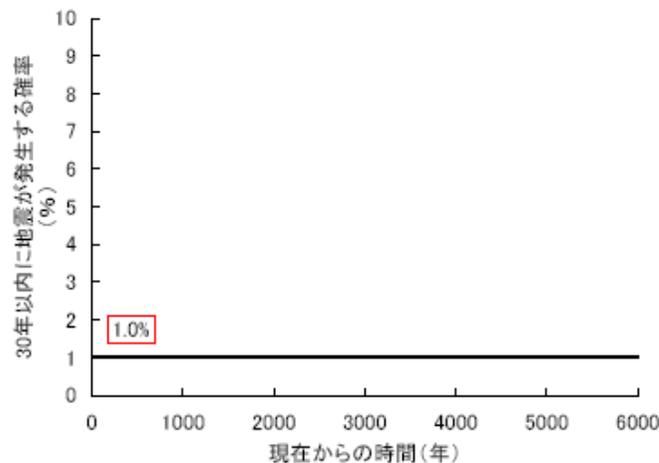
BPT模式

已知最新一次活動時間時，地震之發生間隔以BPT模式為考量

30年以内に地震が発生する確率
(最新活動時期が分からない場合)



30年以内に地震が発生する確率
(最新活動時期が分からない場合)



Poisson模式

當最新一次活動時間未知時，地震之發生假定為Poisson模式

摘自「全国を概観した地震動予測地図」2008年版

池上斷層-整段發生機率

| 整段 (週期) | 最後一次事件 | 30年機率 | 50年機率 | 100年機率 | weight |
|---------|--------|-------|-------|--------|--------|
| 211 | 1951 | 0.06 | 0.14 | 0.38 | 0.03 |
| 122 | 1951 | 0.28 | 0.46 | 0.76 | 0.03 |
| 75 | 1951 | 0.53 | 0.73 | 0.94 | 0.02 |
| 43 | 1951 | 0.77 | 0.92 | 0.99 | 0.02 |
| 權重後加總 | | 3.6% | 5.1% | 7.3% | 0.1 |

池上斷層-北段發生機率

| 北段 (週期) | 最後一次事件 | 30年機率 | 50年機率 | 100年機 | weight |
|---------|--------|-------|-------|-------|--------|
| 152 | 1951 | 0.17 | 0.32 | 0.62 | 0.09 |
| 88 | 1951 | 0.45 | 0.65 | 0.89 | 0.09 |
| 38 | 1951 | 0.82 | 0.94 | 1.00 | 0.06 |
| 22 | 1951 | 0.93 | 0.99 | 1.00 | 0.06 |
| 權重後加總 | | 16.1% | 20.3% | 25.6% | 0.3 |

池上斷層-南段發生機率

| 南段 (週期) | 最後一次事件 | 30年機率 | 50年機率 | 100年機率 | weight |
|---------|--------|-------|-------|--------|--------|
| 147 | 2003 | 0.00 | 0.05 | 0.36 | 0.18 |
| 86 | 2003 | 0.09 | 0.31 | 0.76 | 0.18 |
| 37 | 2003 | 0.64 | 0.88 | 0.99 | 0.12 |
| 21 | 2003 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.12 |
| 權重後加總 | | 21.3% | 29.0% | 44.2% | 0.6 |

池上斷層-發生機率

| | M_w | 30年機率 | 50年機率 | 100年機率 |
|--------|---------|-------|-------|--------|
| | | BPT | BPT | BPT |
| P整段 | 7.1~7.4 | 3.6% | 5.1% | 7.3% |
| P北段 | 6.7~7.1 | 16.1% | 20.3% | 25.6% |
| P南段 | 6.7~7.1 | 21.3% | 29.0% | 44.2% |
| Ptotal | 6.7~7.4 | 36.3% | 46.3% | 61.5% |

$$P_{\text{total}} = 1 - (1 - P_{\text{整段}}) (1 - P_{\text{北段}}) (1 - P_{\text{南段}})$$

Thank you!

