

近斷層效應模型簡介

趙書賢 博士

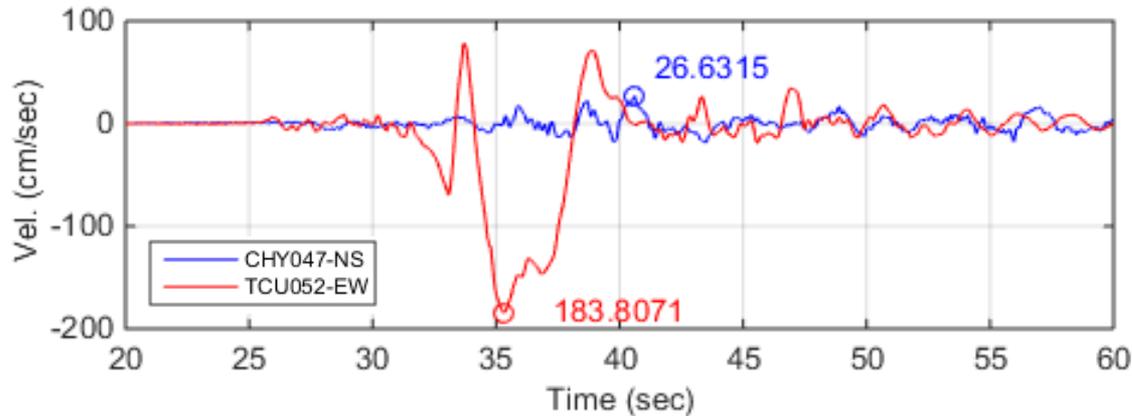
國家地震工程研究中心 副研究員

國家地震工程研究中心

2017/12/25

近斷層效應說明 - I

- 鄰近斷層區域的工址因受到斷層破裂方向性的影響，當斷層發生活動引發地震時，其所引致的地震動其速度歷時很可能伴隨有高峰值之的速度脈衝，因此具該現象的地震動我們稱其為具近斷層效應的地震歷時。



集集地震中具近斷層效應的地震動速度歷時 (光正國小站 TCU052) 與不具近斷層效應的地震動速度歷時 (嘉北國小站 CHY047) 的比較

近斷層效應說明 – II

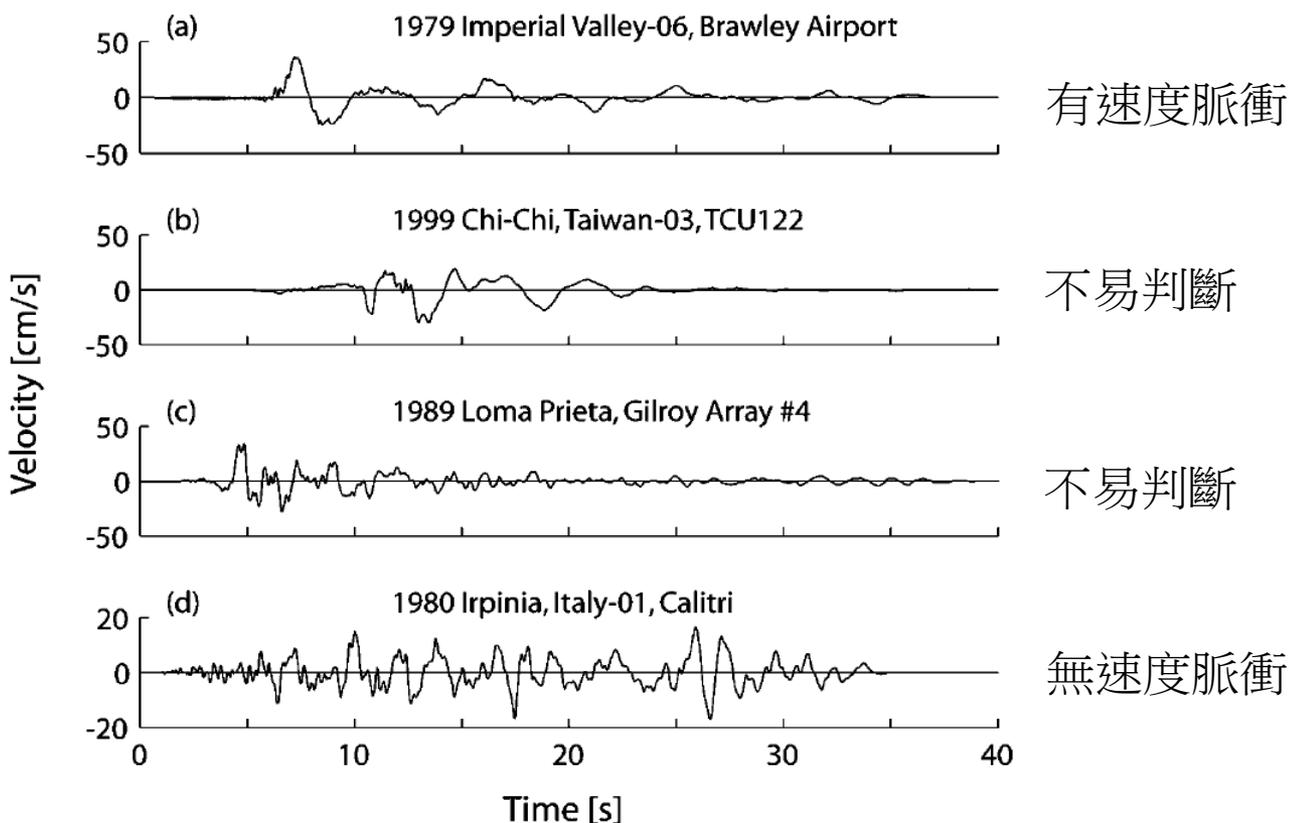
- 美國ATC-63計畫的研究將地震紀錄分為三大類：
 - 遠域地震紀錄 (Far-field records, $R > 10 \text{ km}$)
 - 近域地震紀錄 (Near-field records, $R \leq 10 \text{ km}$)
 - 具速度脈衝 (with velocity pulse) ← 具近斷層效應
 - 不具速度脈衝 (without velocity pulse)
- 造成速度歷時伴隨有速度脈衝的原因可能為：
 - 斷層破裂方向性 (Directivity)
 - 該速度脈衝發生於整段速度歷時的前段
 - 其它 (Baker, 2007)
 - If a site is located near an asperity in the fault rupture, the waves caused by that asperity may produce a pulse at the site.
 - Constructive interference of seismic waves passing through a complicated earth structure such as the edge of a geologic basin might also result in velocity pulses.

近斷層效應的相關議題

- 速度脈衝的特徵為何?
 - 如何判定歷時是否具速度脈衝?
 - 速度脈衝的週期如何訂定?
 - 什麼情況下容易發生速度脈衝?
 - 速度脈衝是否發生在某特定方向?
- 近斷層效應對結構彈性耐震需求的影響為何?
- 近斷層效應對結構非彈性耐震需求的影響為何?

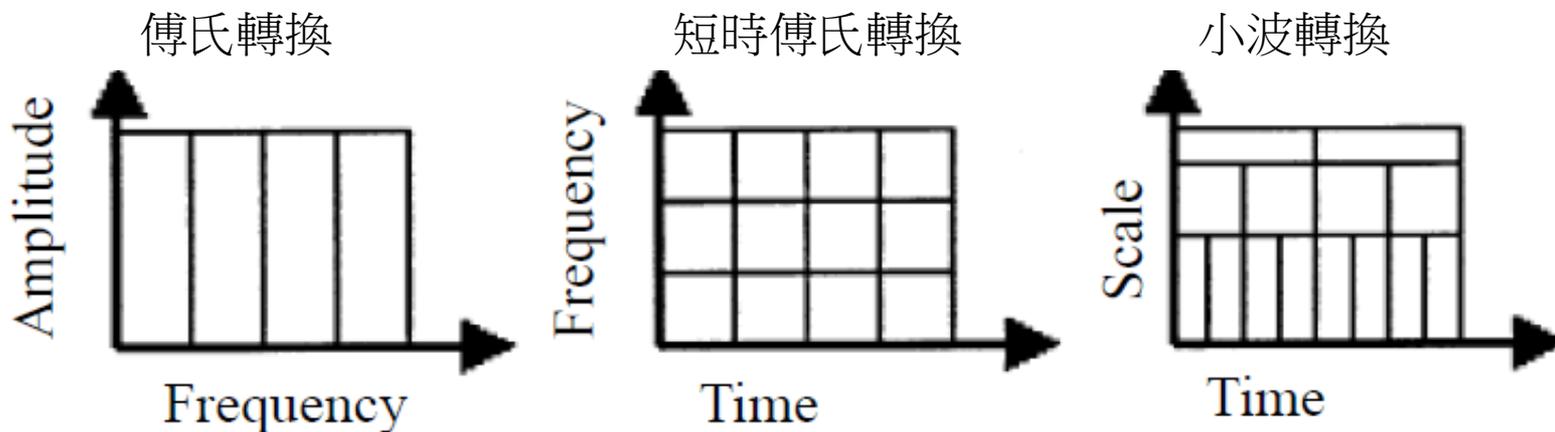
歷時是否具近斷層的判定方式 - I

- 早期的研究採用目視速度歷時的方式來判定，因此非常主觀，且不同研究的判定結果可能並不一致



歷時是否具近斷層的判定方式 - II

- 學者 Shahi and Baker 採用 NGA West 2 計畫的全球地震動資料庫進行研究，建立判定地震紀錄是否含近斷層效應的**量化**方式，其判定的準則為：
 - 速度脈衝指標 (Pulse Indicator, PI) 值需大於0
 - 速度脈衝需發生於歷時的前段 (Early Arrival Condition)
- 速度脈衝指標計算時，須先以連續小波轉換將速度歷時分解成速度脈衝歷時與殘餘歷時兩個部分



連續小波轉換

- 連續小波轉換

$$C(a, b; f(t), \psi(t)) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{a} \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt$$

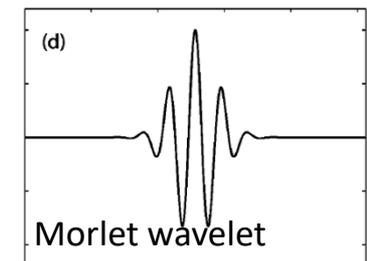
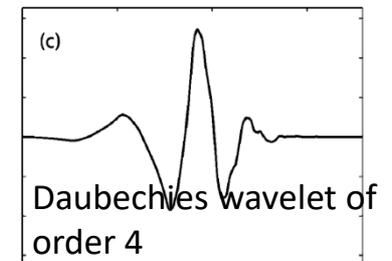
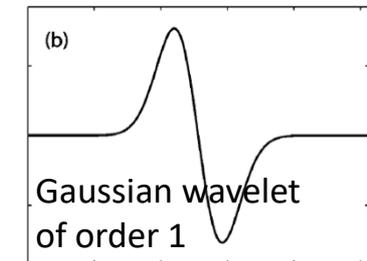
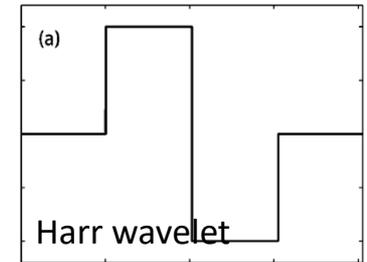
- 連續小波反轉換

$$f(t) = \frac{1}{C_{\psi}} \int_a \int_b \langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle \psi_{a,b}(t) db \frac{da}{a^2}$$

$$C_{\psi} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty$$

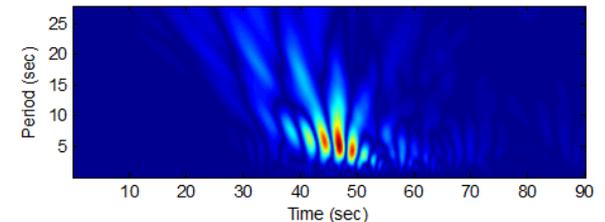
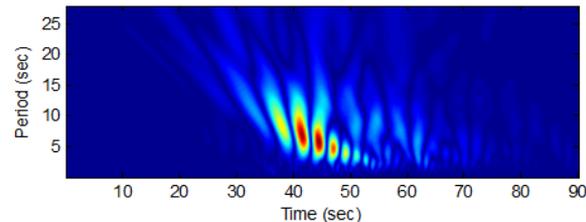
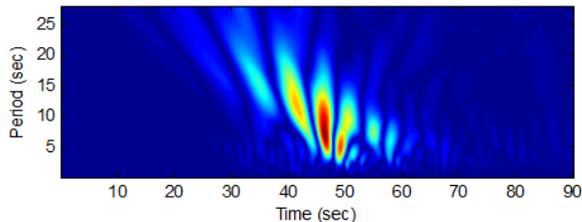
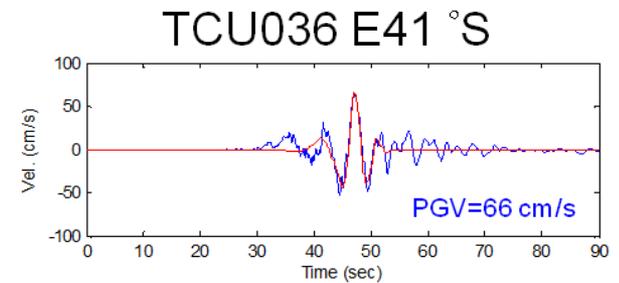
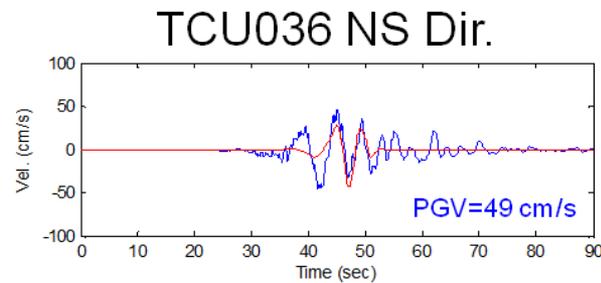
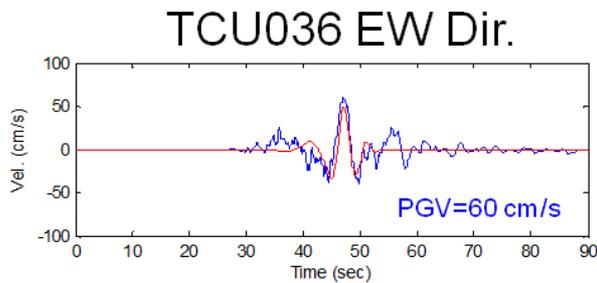
- $\psi(t)$ 為小波母函數

- $C(a,b)$ 為小波係數

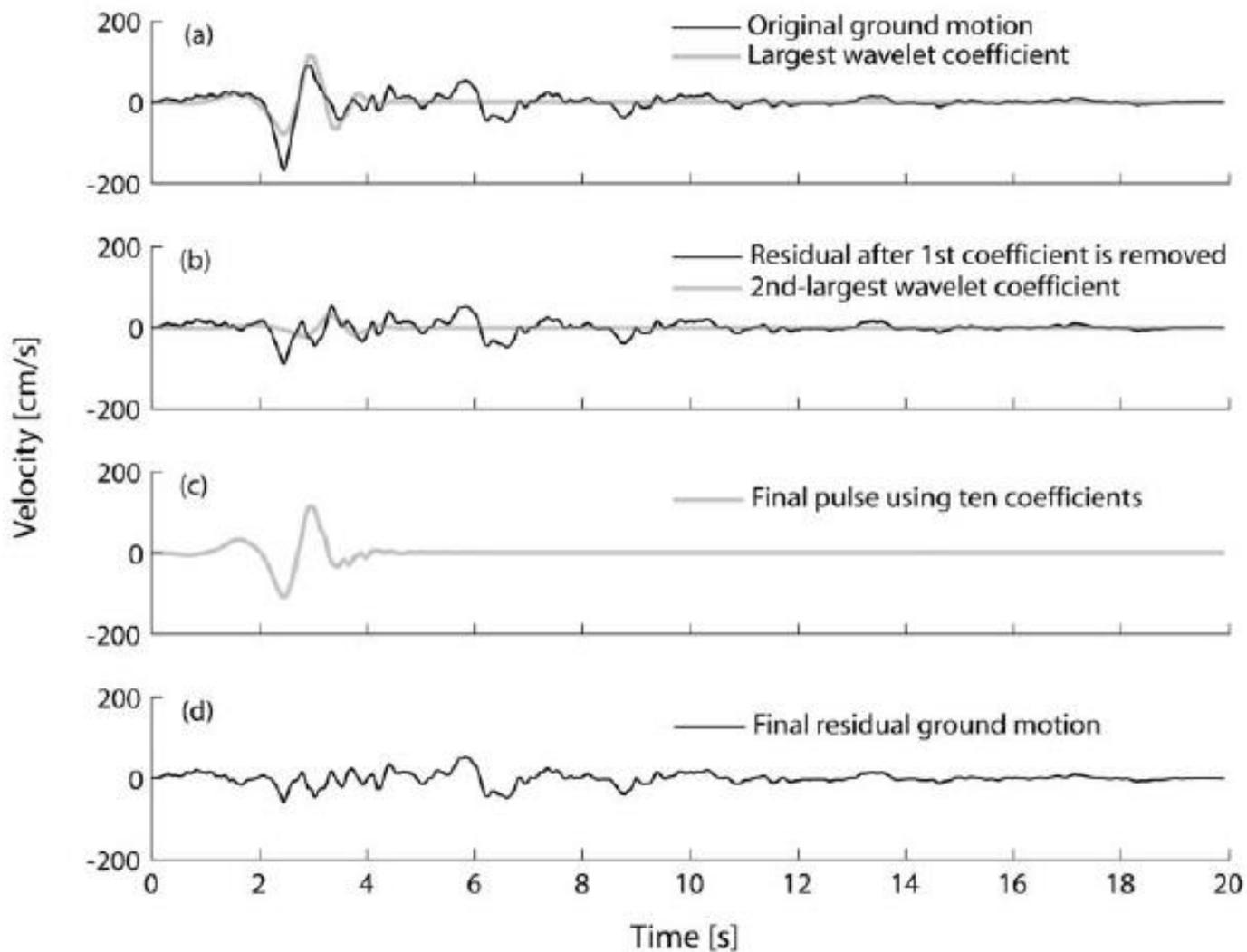


速度脈衝的擷取

- 分別先針對東西向與南北向速度歷時進行小波轉換得到小波係數
- 尋找最大的小波係數所在的頻率、時間與方向
- 尋找最大的小波係數附近前10大的小波係數，利用小波反轉換擷取出速度脈衝歷時



速度脈衝項與殘餘項



速度脈衝指標

■ 速度脈衝指標 PI 之定義 (Shahi and Baker, 2014)

$$- PI = 0.938(0.76 - PC - 0.0616PGV)(PC + 6.914 \times 10^{-4} - 1.072) - 6.179$$

■ 其中

$$- PC = 0.63PGV_{ratio} + 0.777E_{ratio}$$

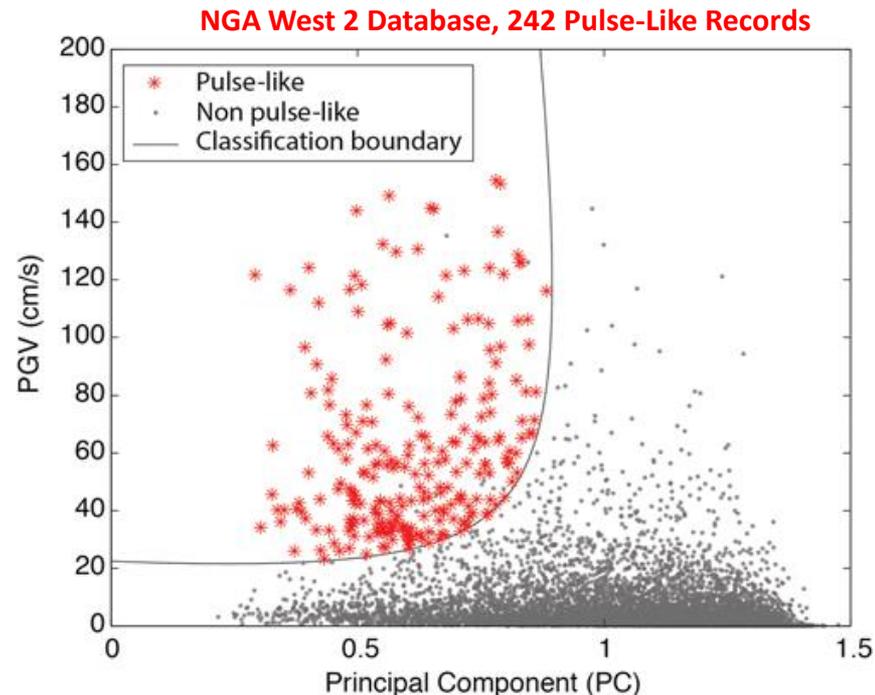
$$- PGV_{ratio} = PGV_{residual} / PGV_{original}$$

$$- E_{ratio} = E_{residual} / E_{original}$$

■ 判斷準則

- $PI > 0$: 具速度脈衝

- $PI \leq 0$: 不具速度脈衝

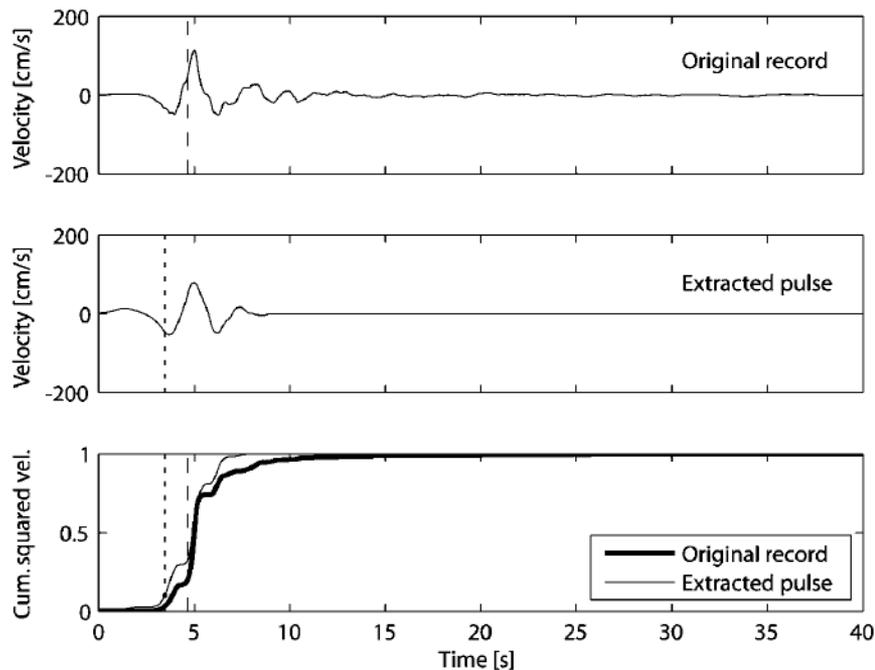


速度脈衝的發生時間

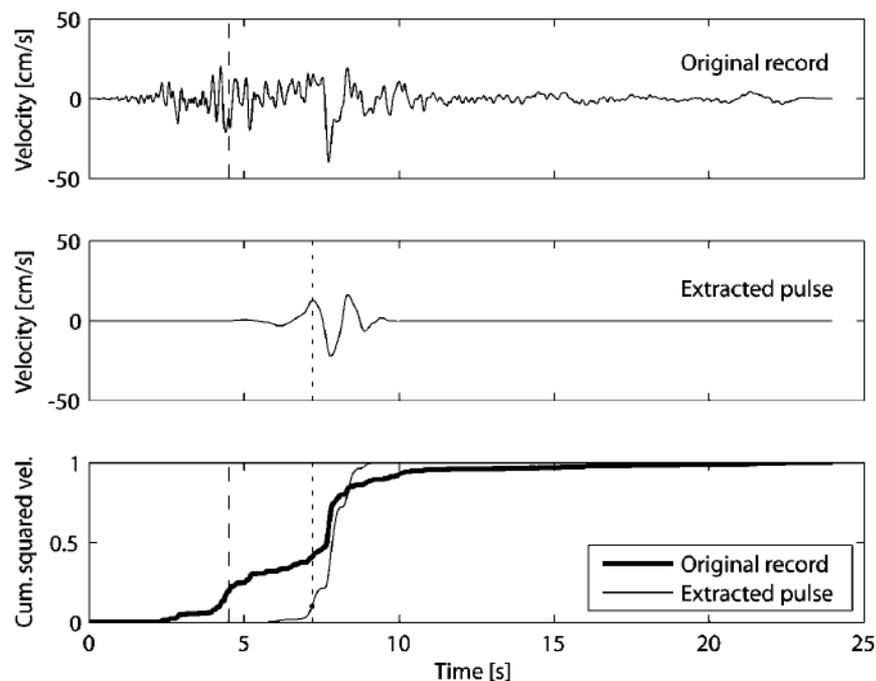
■ 具近斷層速度脈衝的條件

- $t_{5\%,\text{pulse}} < t_{17\%,\text{original}}$
- 其中 $t_{5\%}$ 代表能量達到總能量 5% 所需的時間

發生時間早的速度脈衝



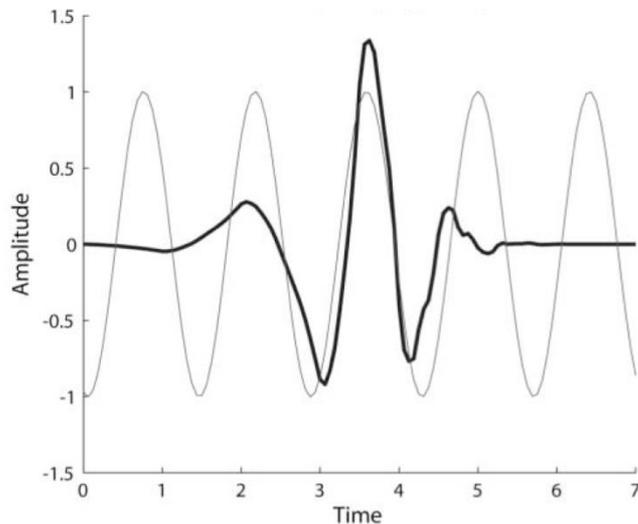
發生時間晚的速度脈衝



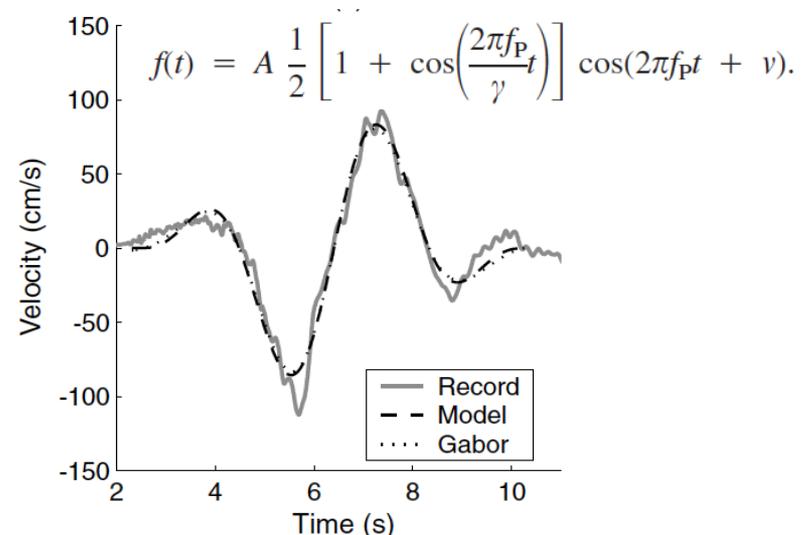
速度脈衝的週期

■ 速度脈衝的週期訂定方式有：

- 以擷取的速度脈衝歷時來訂定其週期
 - 不同的速度脈衝擷取方式會得到不同的結果
 - Mavroeidis and Papageorgiou, 2003: 採用數值函數來訂定
 - Shahi and Baker, 2014: 採用小波母函數的中心頻率來訂定
- 以速度反應譜最大值對應的週期來訂定



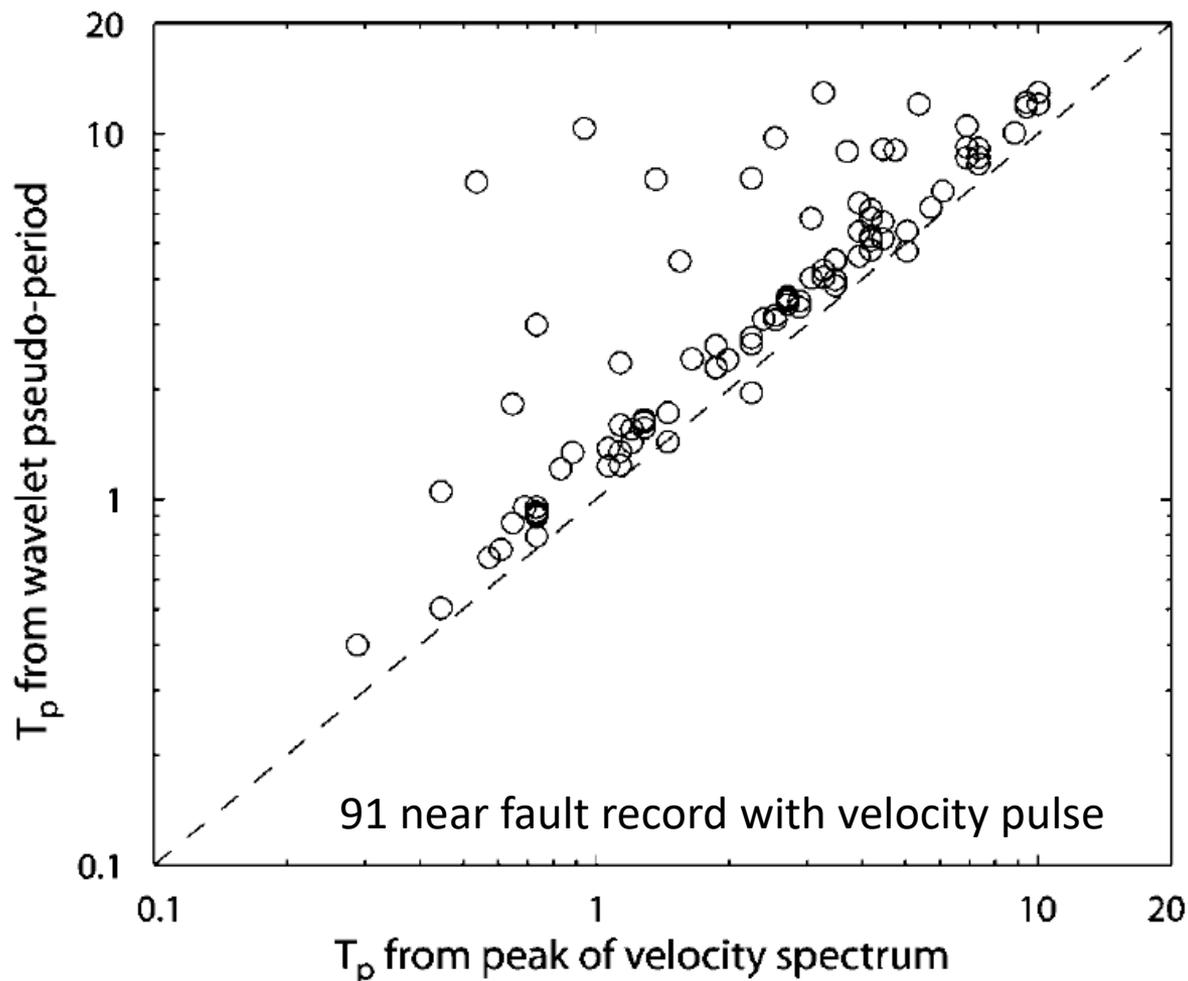
Shahi and Baker, 2014



Mavroeidis and Papageorgiou, 2003

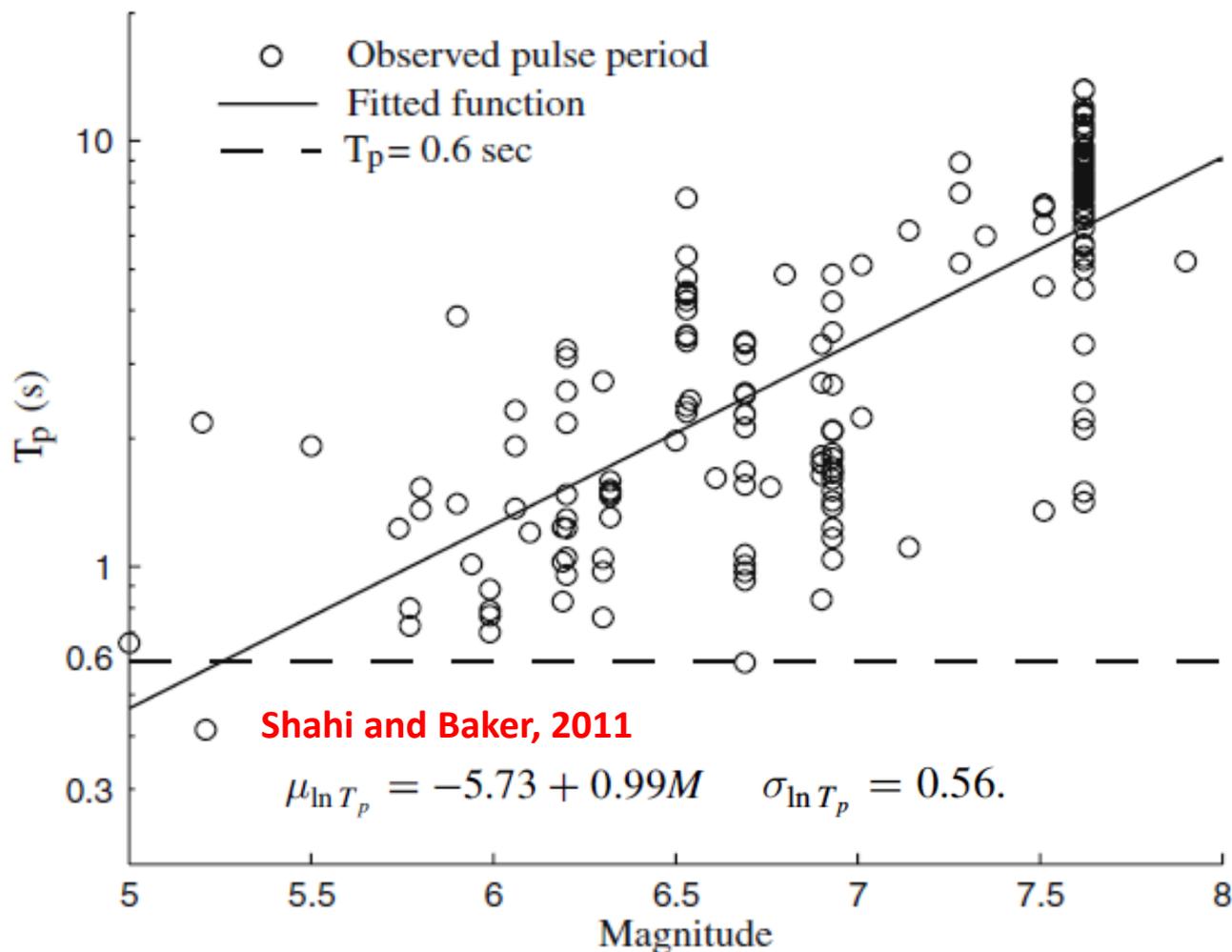
速度脈衝週期與速度反應譜峰值週期的比較

- 速度脈衝的週期不完全等同於速度反應譜峰值的週期
- 速度脈衝的週期大部分比速度反應譜峰值的週期要大



速度脈衝的週期與地震規模的關係

- 地震規模越大可能引致的速度脈衝其週期越長
- 大部分的速度脈衝週期都大於**0.6秒**

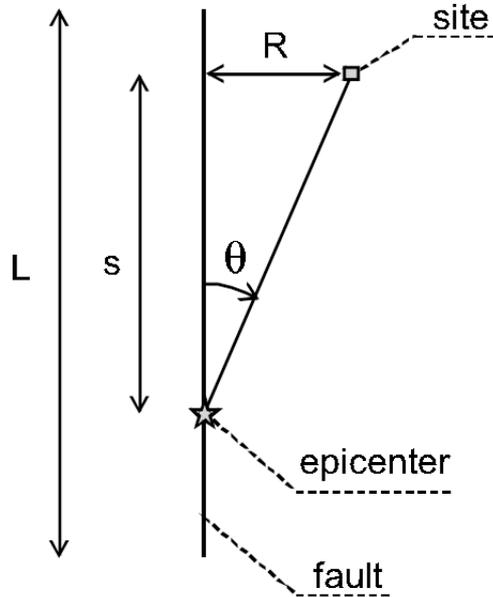


測站發生速度脈衝的機率

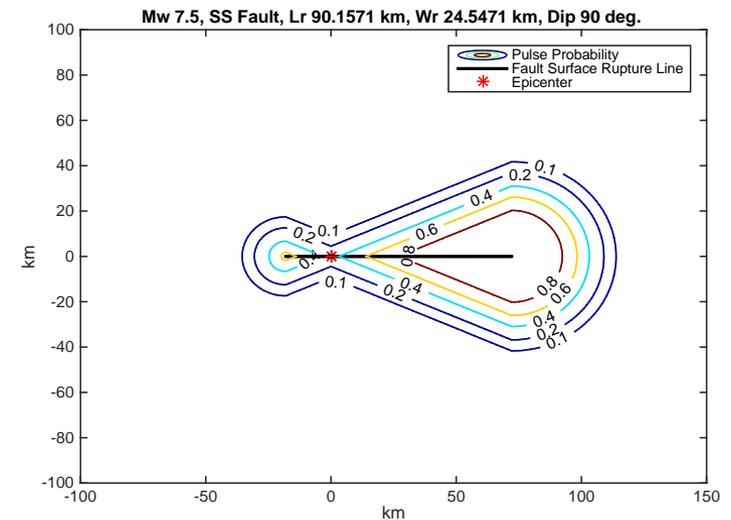
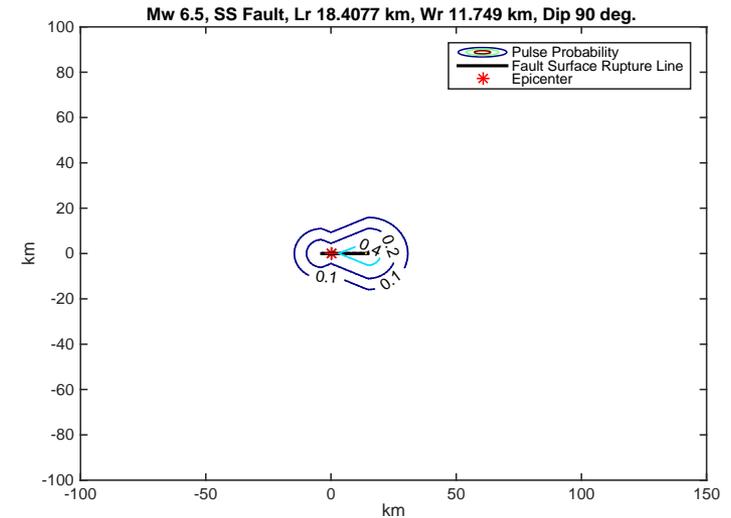
■ Shahi and Baker, 2011

平移斷層

SS Plan View



$$P(\text{pulse}) = \frac{1}{1 + \exp(0.642 + 0.167r - 0.075s)}$$

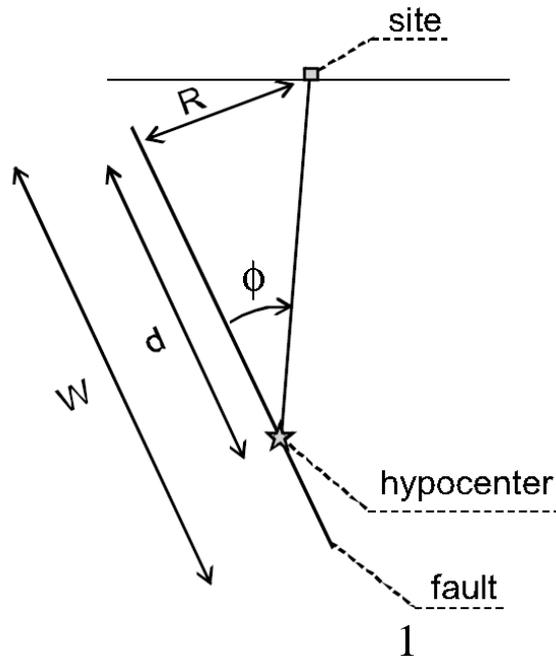


測站發生速度脈衝的機率

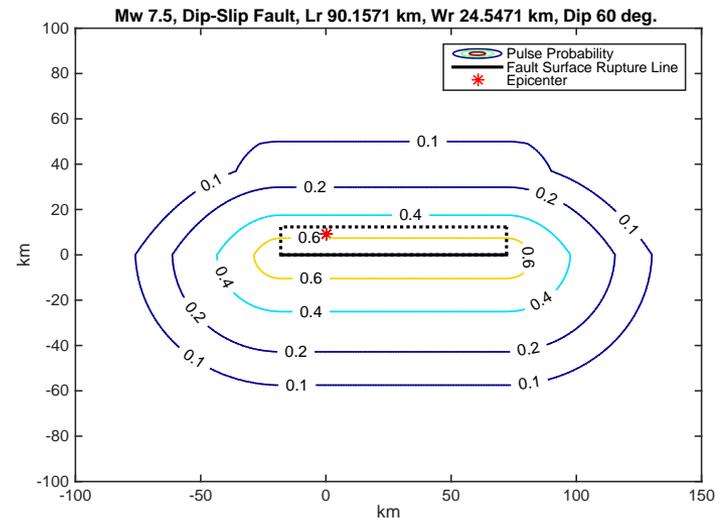
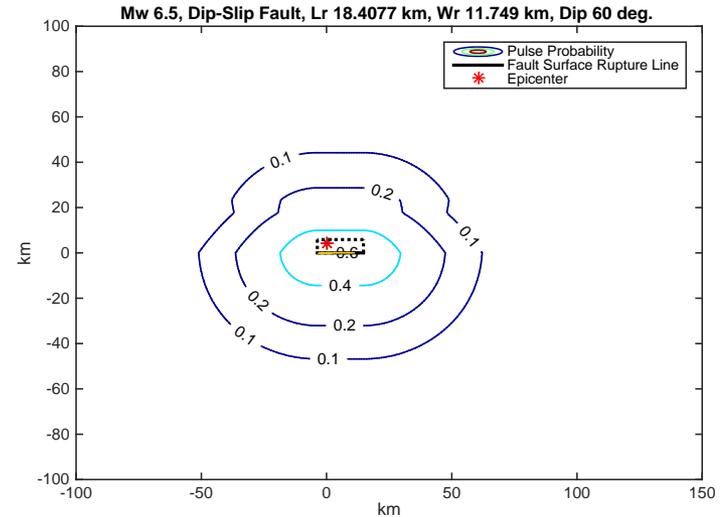
■ Shahi and Baker, 2011

非平移斷層

DS Side View

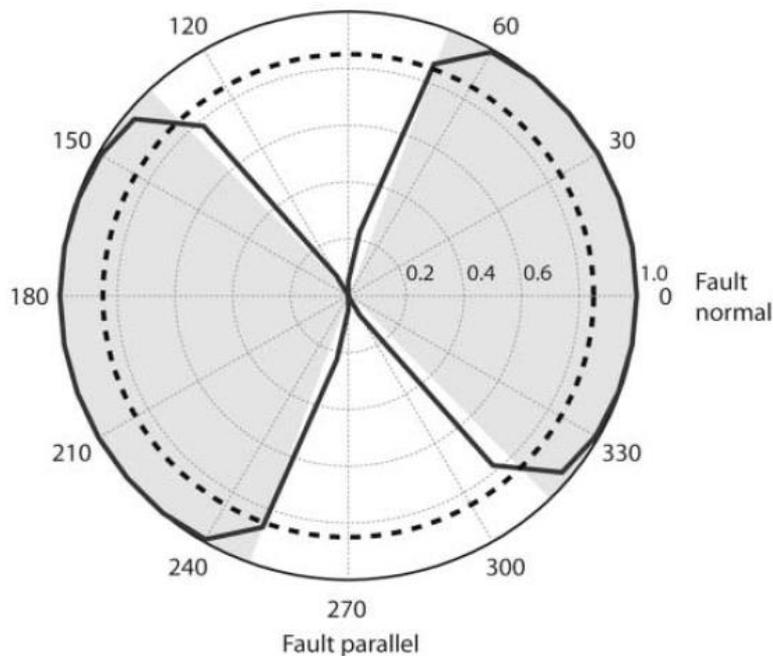


$$P(\text{pulse}) = \frac{1}{1 + \exp(0.128 + 0.055r - 0.061d + 0.036f)}$$

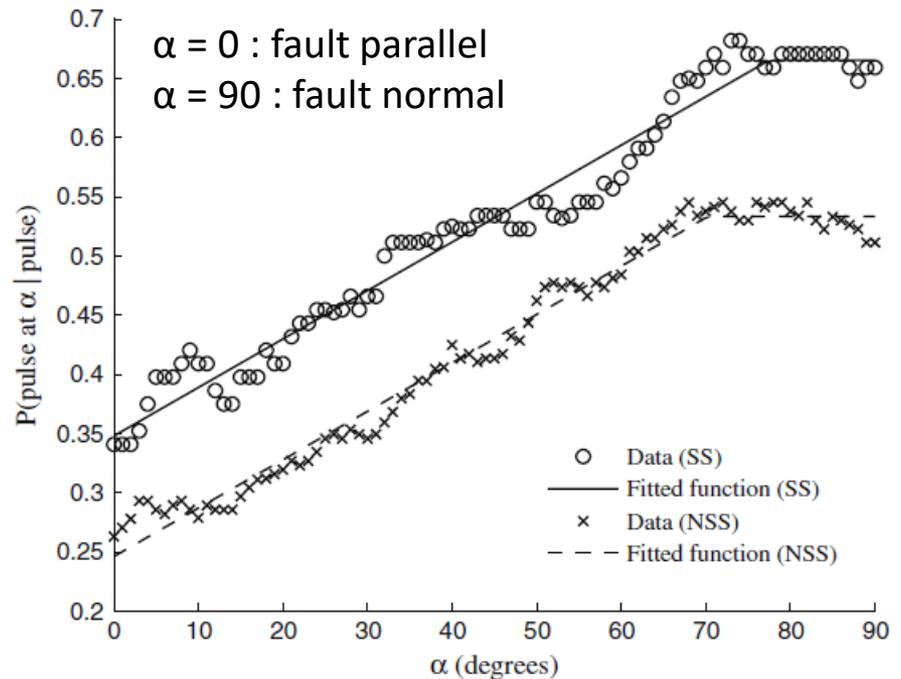


速度脈衝發生的方向

- 大部分的速度脈衝出現在垂直斷層線的方向，因此於結構分析時需依據結構與斷層的相對位置來評估速度脈衝輸入的方向性



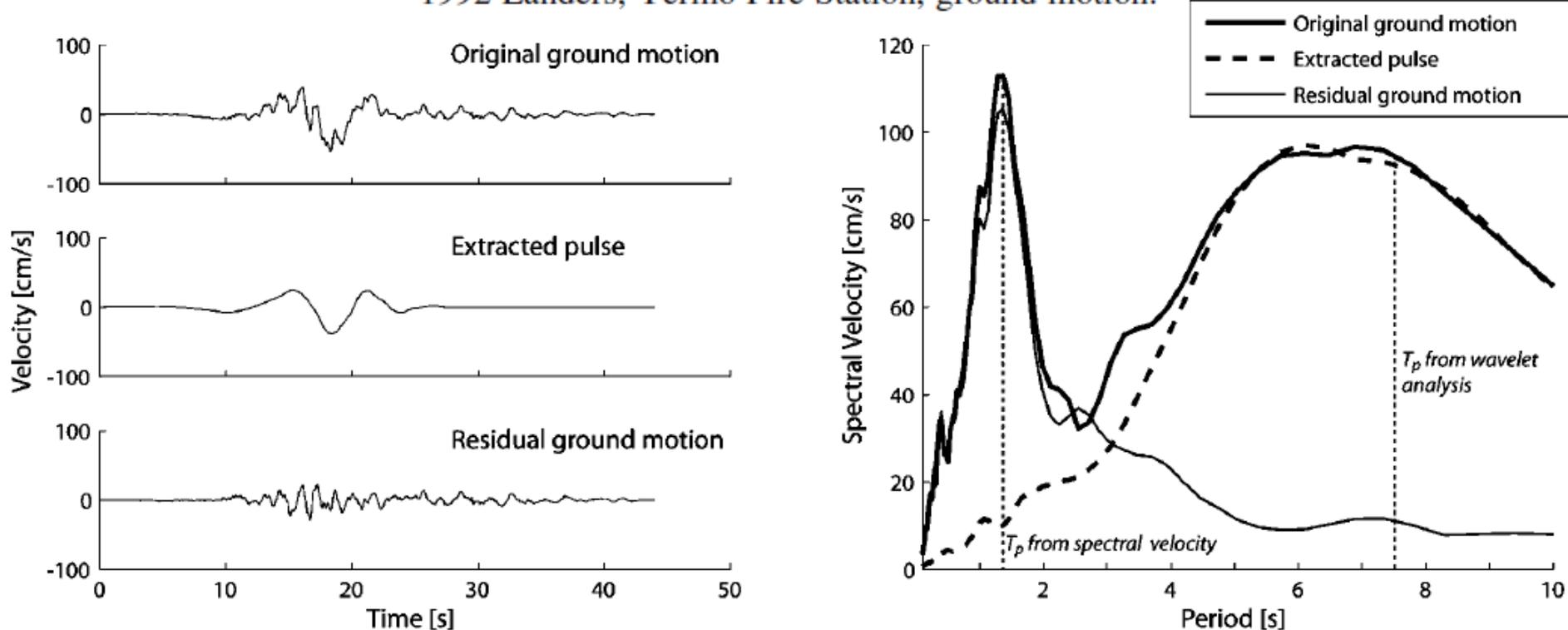
Chi-Chi Earthquake, TCU075 Station



速度脈衝對彈性反應譜的影響

- 速度脈衝會增加基本振動週期與速度脈衝週期相近之結構物的彈性耐震需求

1992 Landers, Yermo Fire Station, ground motion.



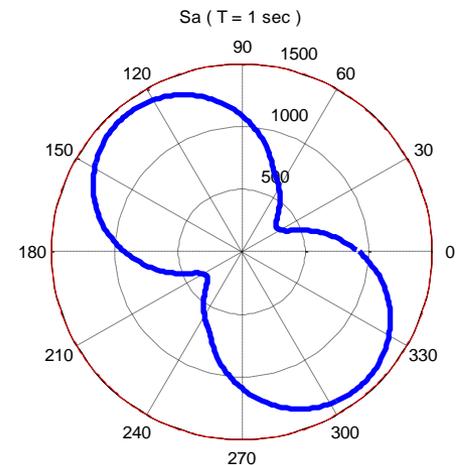
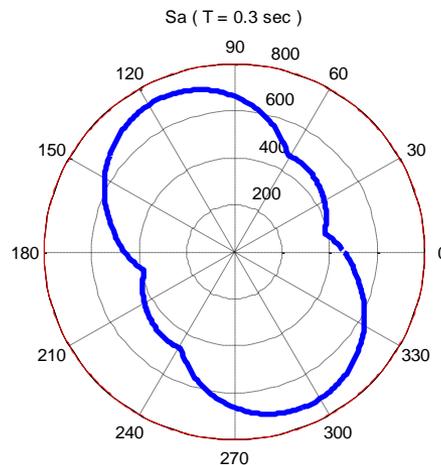
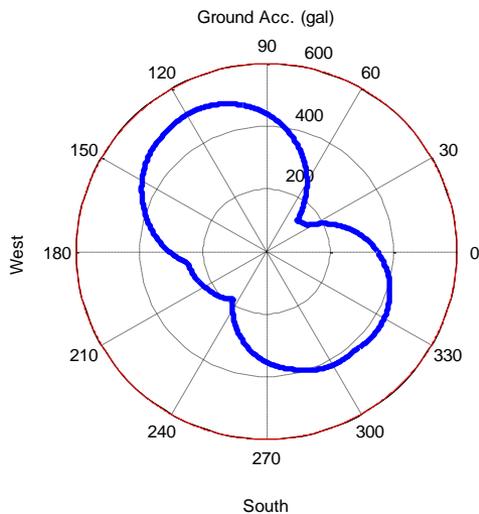
Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 97, No. 5, pp. 1486–1501, October 2007, doi: 10.1785/0120060255

彈性反應譜調整係數

- 全球目前僅有一個地震動模型 (Chiou and Youngs, 2014) 有考量斷層破裂方向性對彈性反應譜預測結果的影響
- 其餘的研究則是建立彈性反應譜調整係數，評估有無速度脈衝或是考量斷層破裂方向性時對彈性反應譜預測結果的影響
 - Shahi and Baker (2011)
 - Shahi and Baker (2013)
 - Bayless and Somerville (2013)
 - Others

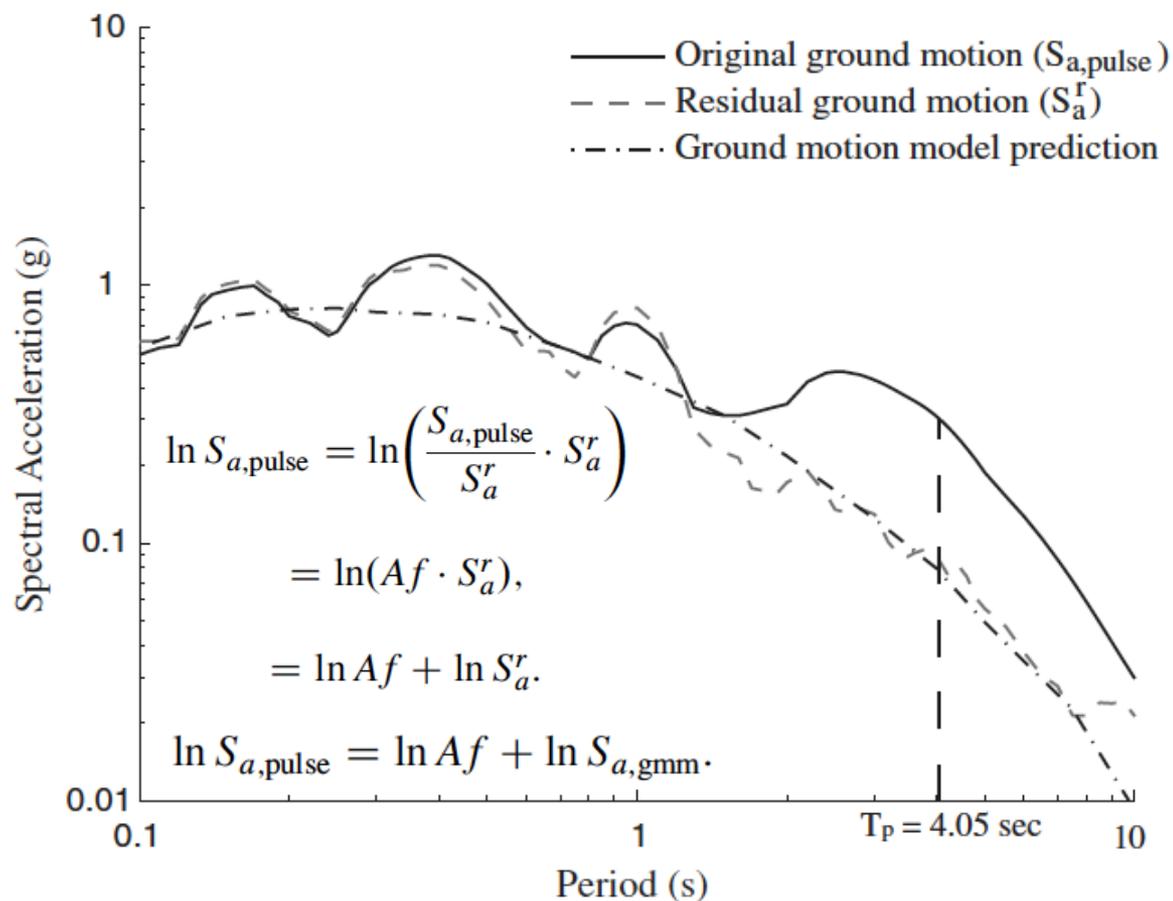
反應譜的方向性

- 水平向彈性反應譜的計算方式包括有：
 - 單一方向 (東西向、南北向、最大值的方向、最小值的方向)
 - 東西向與南北向的幾何平均
 - **各方向的反應譜值的中值 (RotD50)**
 - 與 RotD50 反應譜最接近的方向之反應譜 (RotI50)



彈性反應譜調整係數 – Shahi and Baker, 2011

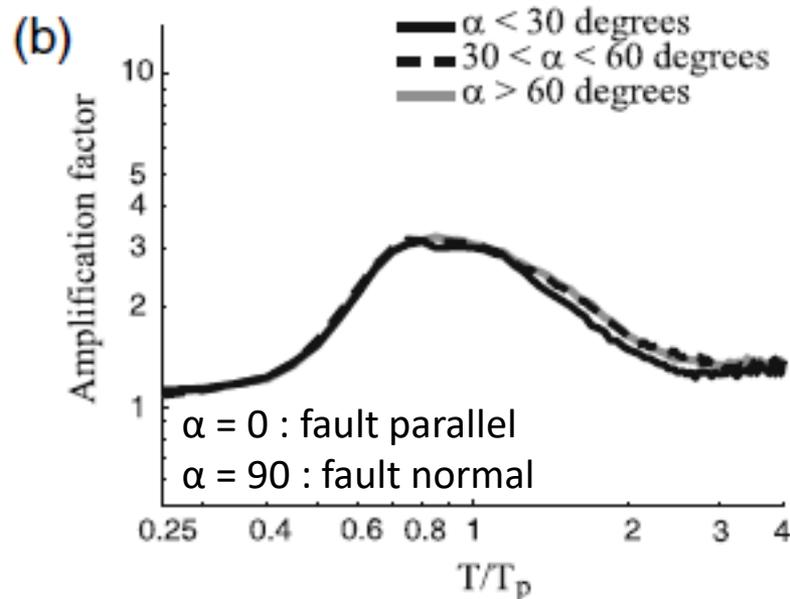
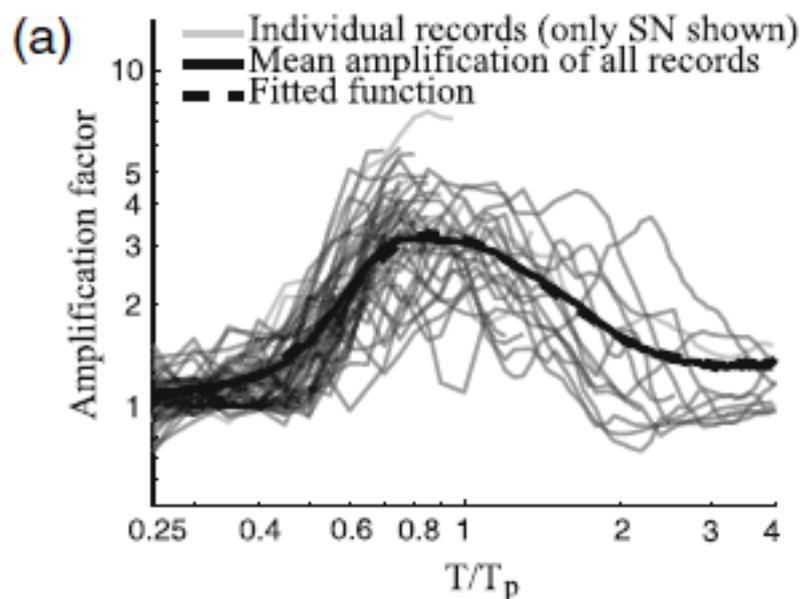
- 採用速度脈衝的反應譜與殘差項反應譜的比值來計算彈性反應譜調整係數 A_f
- 評估不同方向之反應譜對分析結果的影響



彈性反應譜調整係數 – Shahi and Baker, 2011

■ Shahi and Baker, 2011

$$\mu_{lnAf} = \begin{cases} 1.131 \exp(-3.11 \cdot (\ln(T / T_p) + 0.127)^2) + 0.058 & \text{if } T \leq 0.88T_p \\ 0.924 \exp(-2.11 \cdot (\ln(T / T_p) + 0.127)^2) + 0.255 & \text{if } T > 0.88T_p \end{cases}$$



■ 不同方向的彈性反應譜調整係數並未有太大差異

彈性反應譜調整係數 – Shahi and Baker, 2013

- 採用未考慮斷層破裂方向性的地震動模型 (Campbell and Bozorgnia, 2014) 配合速度脈衝指標來計算彈性反應譜調整係數Amp

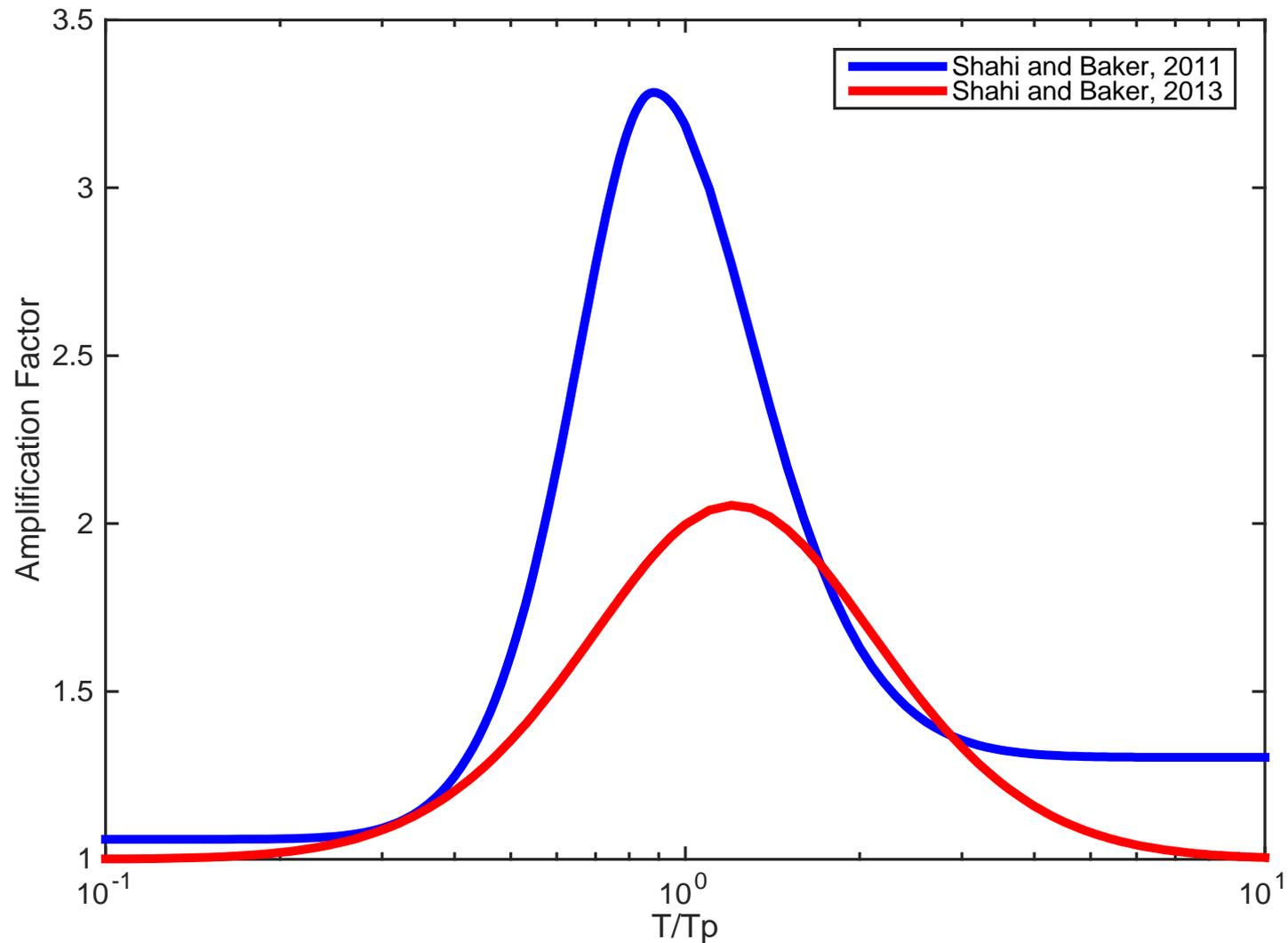
$$\ln Sa_{ij} = f(M_i, R_j, T, V s30_j, \tilde{\Theta}, \dots) + I_{directivity} \cdot \ln Amp(T, T_p) + \eta_i + \epsilon_{ij}$$

$$\ln Amp(T, T_p) = b_0 \exp \left(b_1 \left(\ln \left(\frac{T}{T_p} \right) - b_2 \right)^2 \right)$$

$$b_0 = 0.72, b_1 = -1.10, b_2 = -0.19.$$

- 其中 $I_{directivity}$ 的值為0或1，Sa採用RotD50彈性反應譜

彈性反應譜調整係數比較



彈性反應譜調整係數

– Bayless and Somerville, 2013

- 採用四個NGA West計畫未考慮斷層破裂方向性的地震動模型其殘差項來開發彈性反應譜調整係數 ($\exp(f_D)$)

$$\ln (S a_{dir}) = \ln (S a) + f_D$$

$$f_D = (C_0 + C_1 * f_{geom}) * T_{CD} * T_{M_w} * T_{Az}$$

- 其中

- $S a_{dir}$: 考慮破裂方向性的譜加速度
- $S a$: 未考慮破裂方向性的譜加速度 (RotD50, FN, FP)
- f_D : 破裂方向性調整因子
- C_0 and C_1 : 週期相關的模型係數
- f_{geom} : 幾何調整因子
- T_{CD} : 距離調整因子
- T_{M_w} : 規模調整因子
- T_{Az} : 方位角調整因子

破裂方向性模型係數

- 破裂方向性模型僅會對週期大於0.5秒的結構有影響

Strike-Slip Rupture

Period (sec)	Strike-Slip					
	RotD50		FN		FP	
	C0	C1	C0	C1	C0	C1
0.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.75	0.000	0.000	-0.080	0.055	0.000	0.000
1	-0.120	0.075	-0.225	0.110	0.015	0.000
1.5	-0.175	0.090	-0.300	0.135	0.030	-0.025
2	-0.210	0.095	-0.325	0.160	0.050	-0.040
3	-0.235	0.099	-0.365	0.185	0.070	-0.045
4	-0.255	0.103	-0.390	0.205	0.080	-0.050
5	-0.275	0.108	-0.410	0.215	0.090	-0.060
7.5	-0.290	0.112	-0.420	0.220	0.100	-0.070
10	-0.300	0.115	-0.425	0.225	0.108	-0.071

Down-Dip Rupture

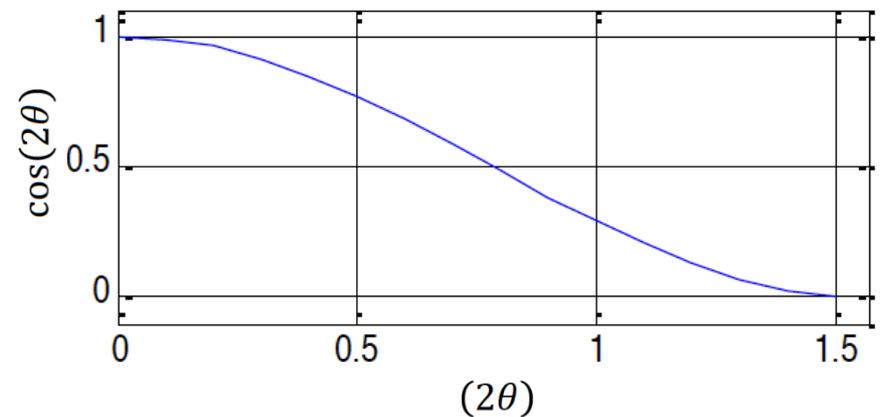
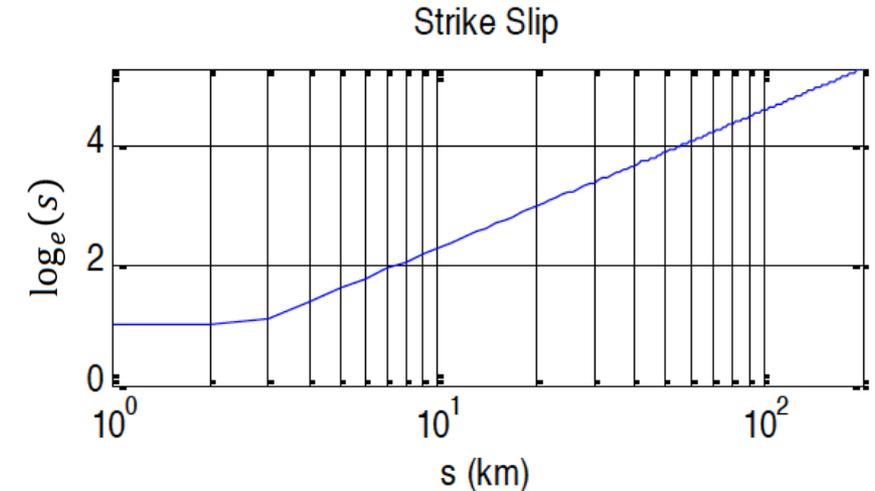
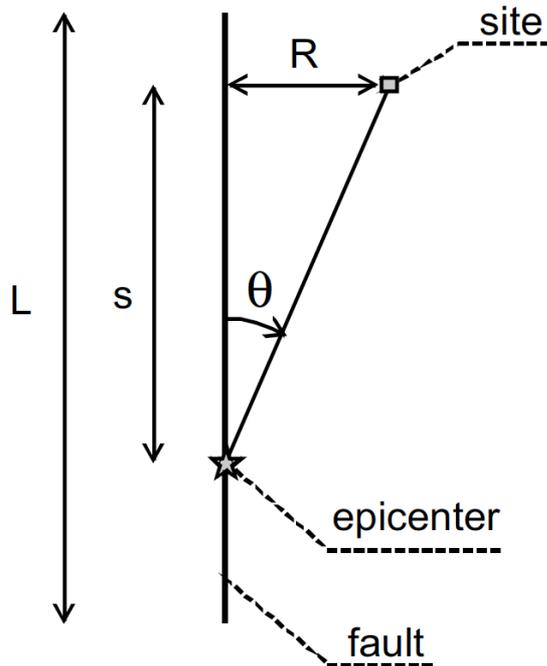
Period (sec)	Dip-Slip					
	RotD50		FN		FP	
	C0	C1	C0	C1	C0	C1
0.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.75	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.000	0.034	0.000	0.056	0.000	0.030
3	-0.033	0.093	-0.034	0.120	-0.034	0.080
4	-0.089	0.128	-0.092	0.142	-0.110	0.120
5	-0.133	0.150	-0.115	0.160	-0.175	0.150
7.5	-0.160	0.165	-0.122	0.165	-0.195	0.170
10	-0.176	0.179	-0.125	0.170	-0.200	0.175

FN: 垂直斷層方向 FP: 平行斷層方向 RotD50: 各方向的中值

破裂方向性模型的幾何調整因子 - I

Strike-Slip Rupture

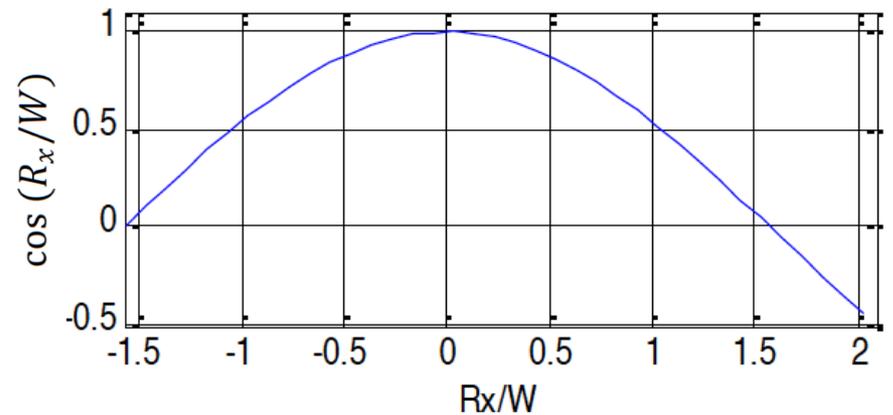
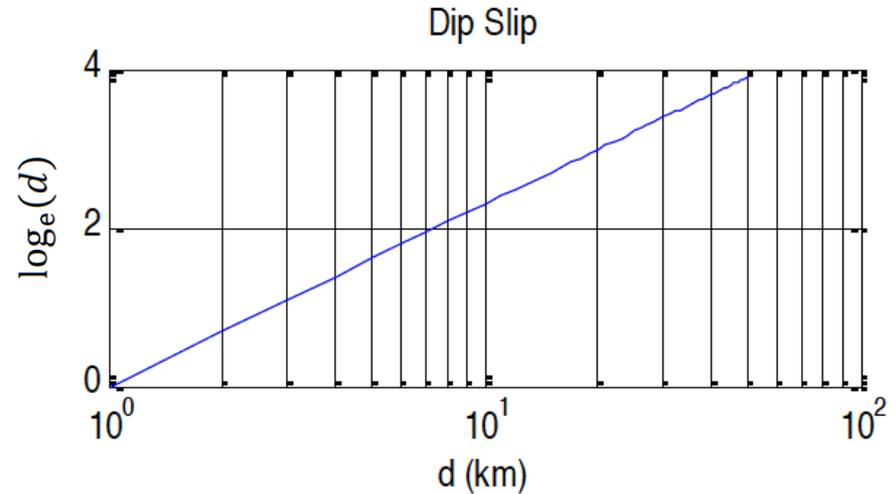
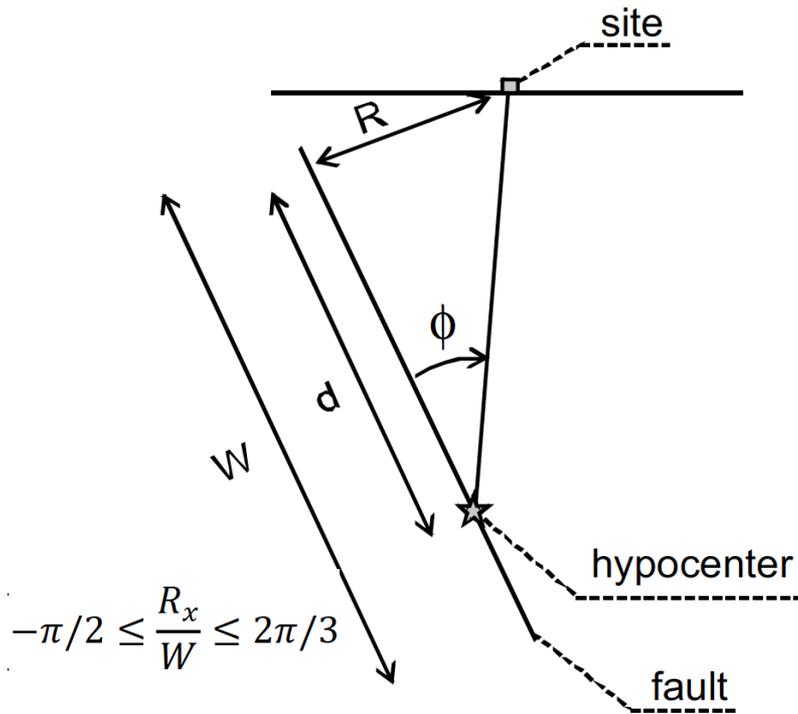
$$f_{geom}(s, \theta) = \log_e(s) * (0.5 \cos(2\theta) + 0.5)$$



破裂方向性模型的幾何調整因子 - II

Down-Dip Rupture

$$f_{geom}(d, R_x) = \log_e(d) * \cos(R_x/W)$$



破裂方向性模型的距離調整因子

Strike-Slip Rupture

$$\begin{aligned} T_{CD}(R_{rup}, L) &= 1 && \text{for } \frac{R_{rup}}{L} < 0.5 \\ &= 1 - (R_{rup}/L - 0.5) / 0.5 && \text{for } 0.5 < R_{rup}/L < 1 \\ &= 0 && \text{for } R_{rup}/L > 1.0 \end{aligned}$$

Down-Dip Rupture

$$\begin{aligned} T_{CD}(R_{rup}, W) &= 1 && \text{for } R_{rup}/W < 1.5 \\ &= 1 - (R_{rup}/W - 1.5) / 0.5 && \text{for } 1.5 < R_{rup}/W < 2.0 \\ &= 0 && \text{for } R_{rup}/W > 2.0 \end{aligned}$$

破裂方向性模型的規模調整因子

Strike-Slip Rupture

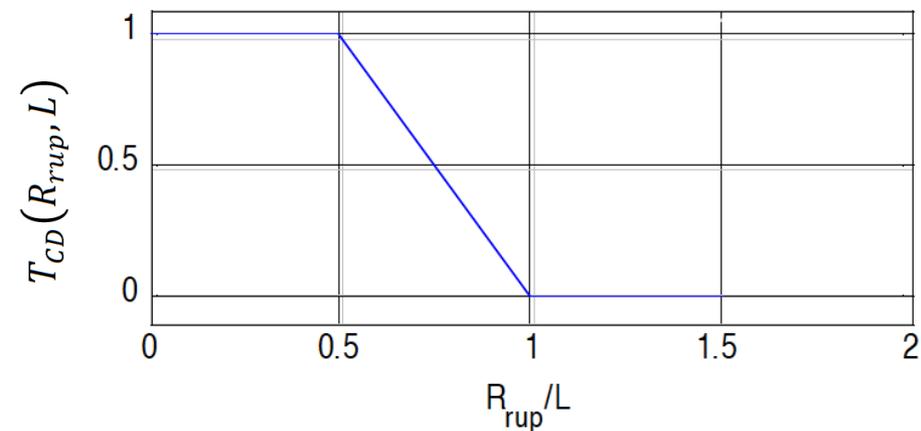
$$\begin{aligned} T_{M_w}(M_w) &= 1 && \text{for } M_w > 6.5 \\ &= 0 && \text{for } M_w < 5.0 \\ &= 1 - (6.5 - M_w) / 1.5 && \text{for } 5.0 < M_w < 6.5 \end{aligned}$$

Down-Dip Rupture

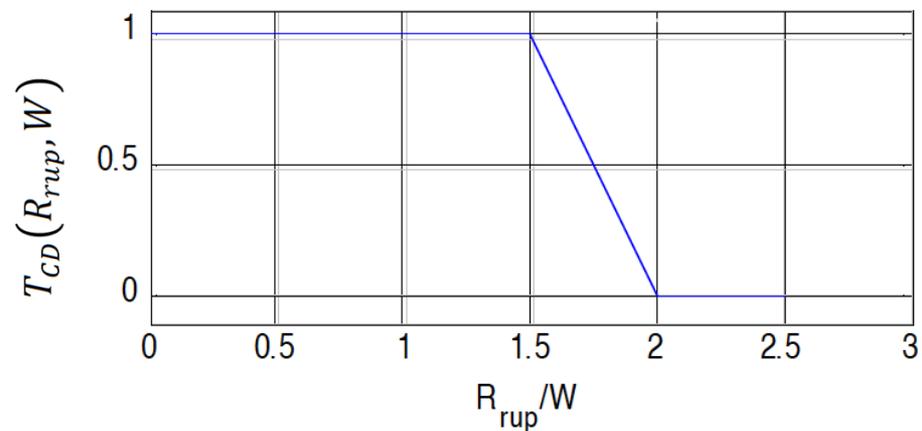
$$\begin{aligned} T_{M_w}(M_w) &= 1 && \text{for } M_w > 6.5 \\ &= 1 - (6.5 - M_w) / 1.5 && \text{for } 5.0 < M_w < 6.5 \\ &= 0 && \text{for } M_w < 5.0 \end{aligned}$$

破裂方向性模型的規模與距離調整因子

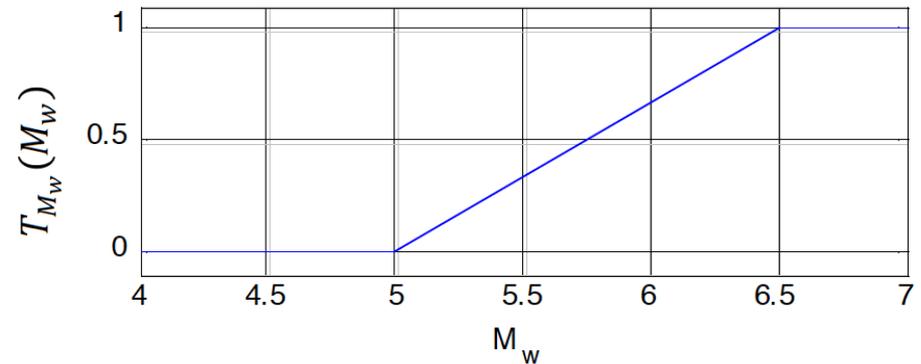
Strike Slip



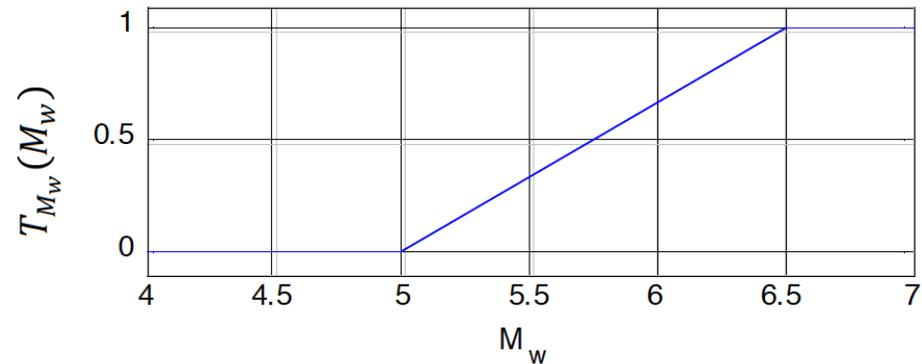
Dip Slip



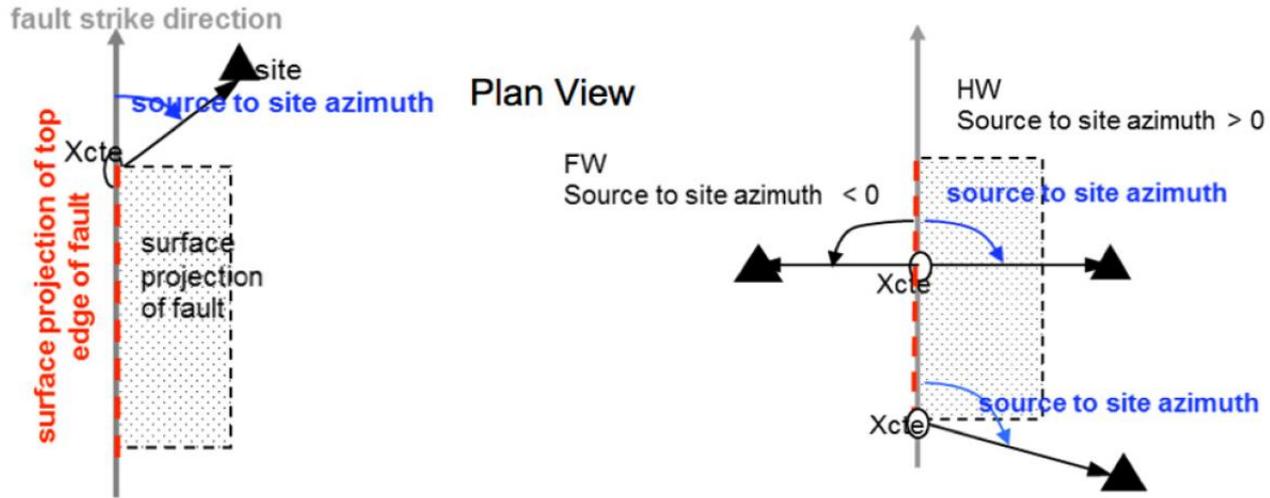
Strike Slip



Dip Slip

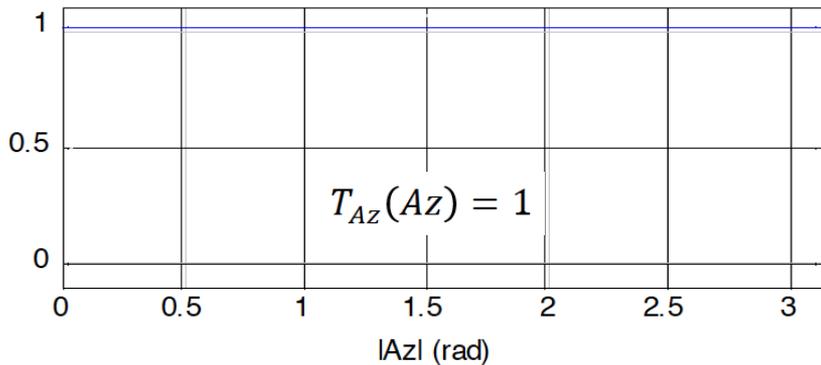


破裂方向性模型的方位角调整因子



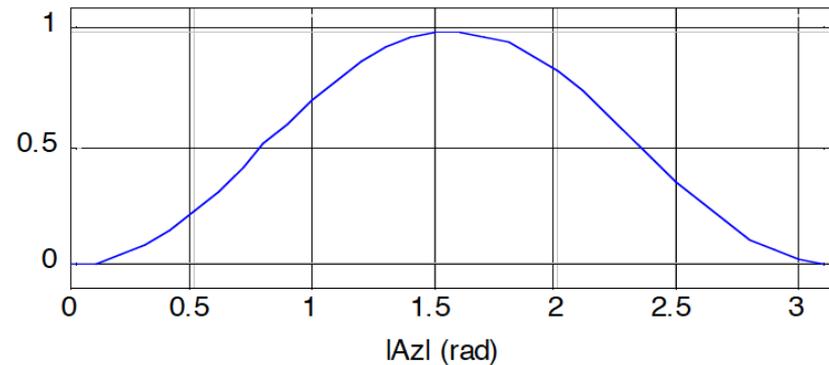
Strike-Slip Rupture

Strike Slip

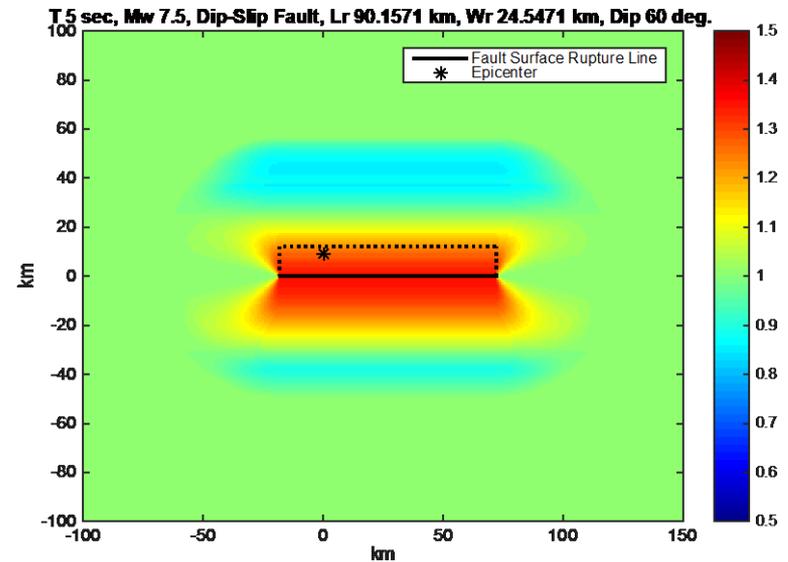
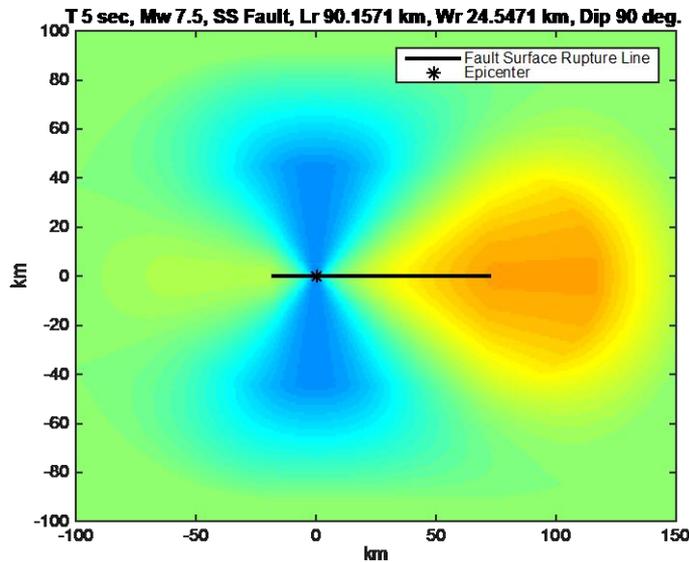
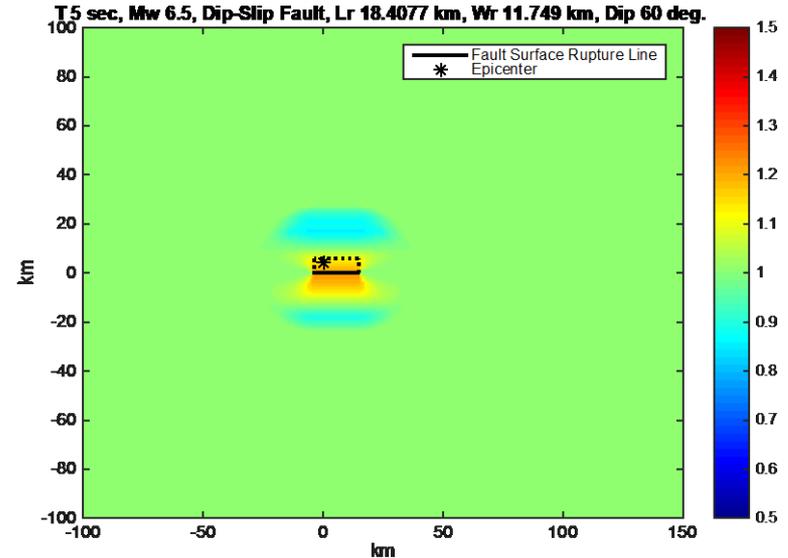
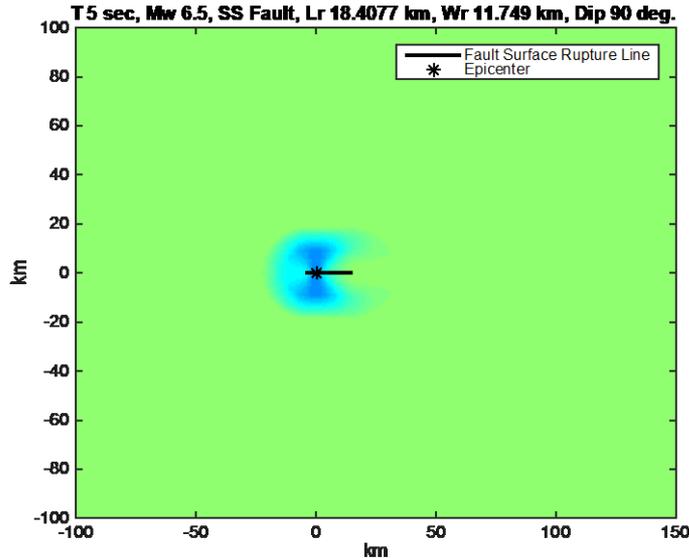


Down-Dip Rupture

Dip Slip



破裂方向性模型的預測結果



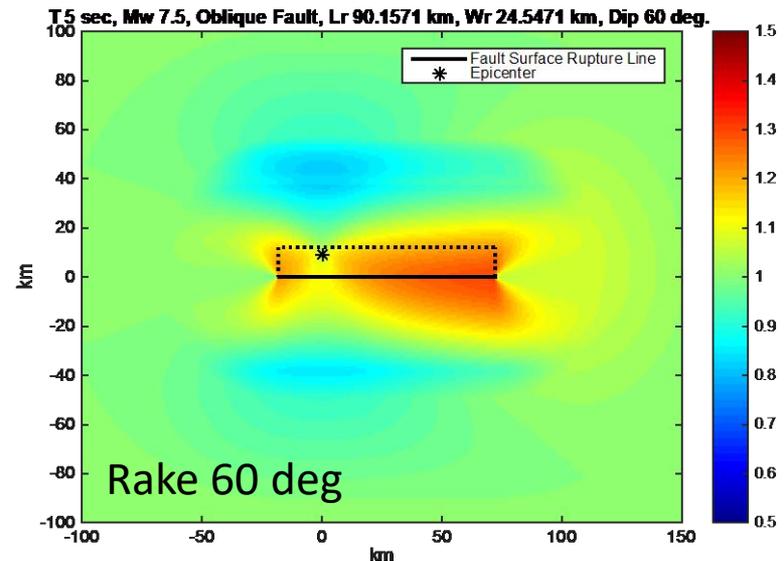
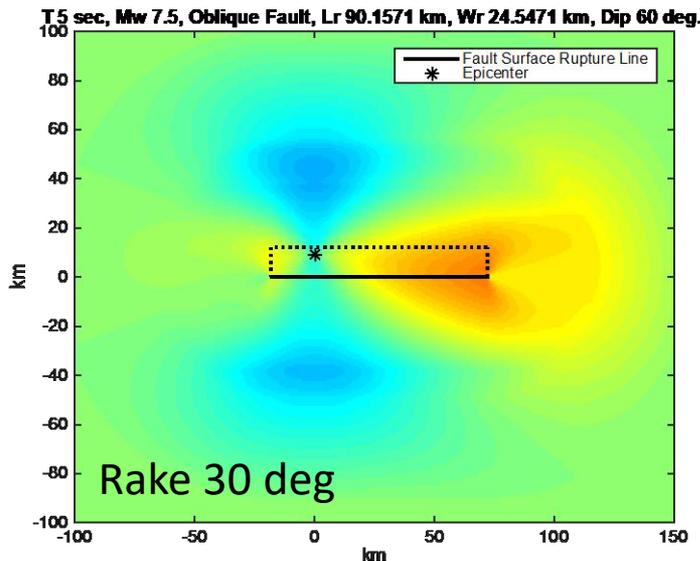
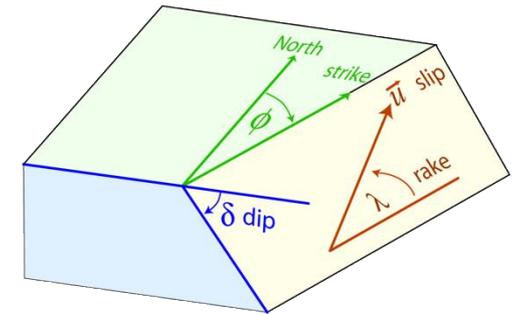
平移兼滑移斷層的應用方式

- 平移兼滑移斷層的彈性反應譜調整係數可計算如下：

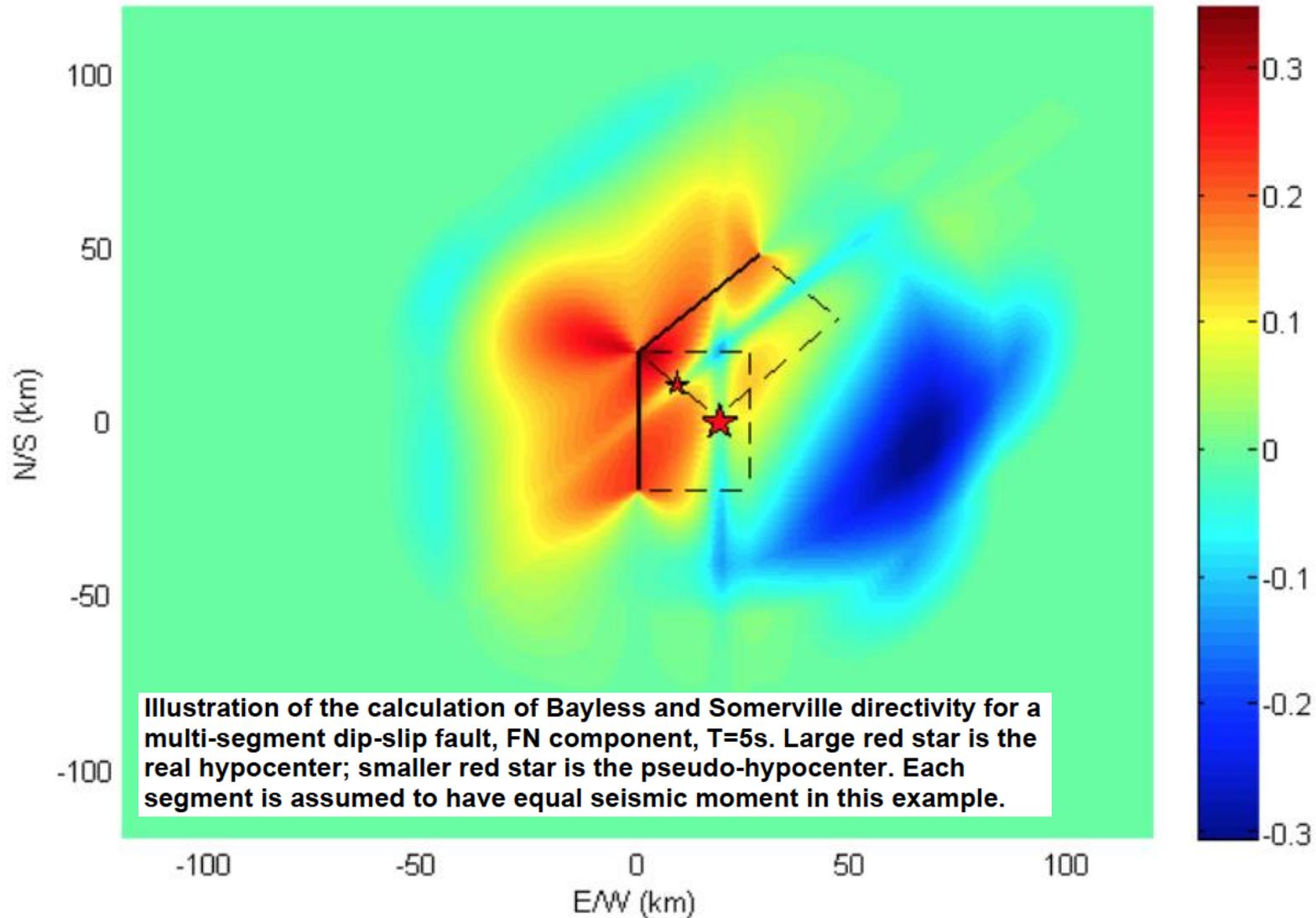
$$f_D = \text{StrikeWeight} * (f_{D_strike}) + \text{DipWeight} * (f_{D_dip})$$

$$\text{DipWeight} = \text{Q1Rake}/90$$

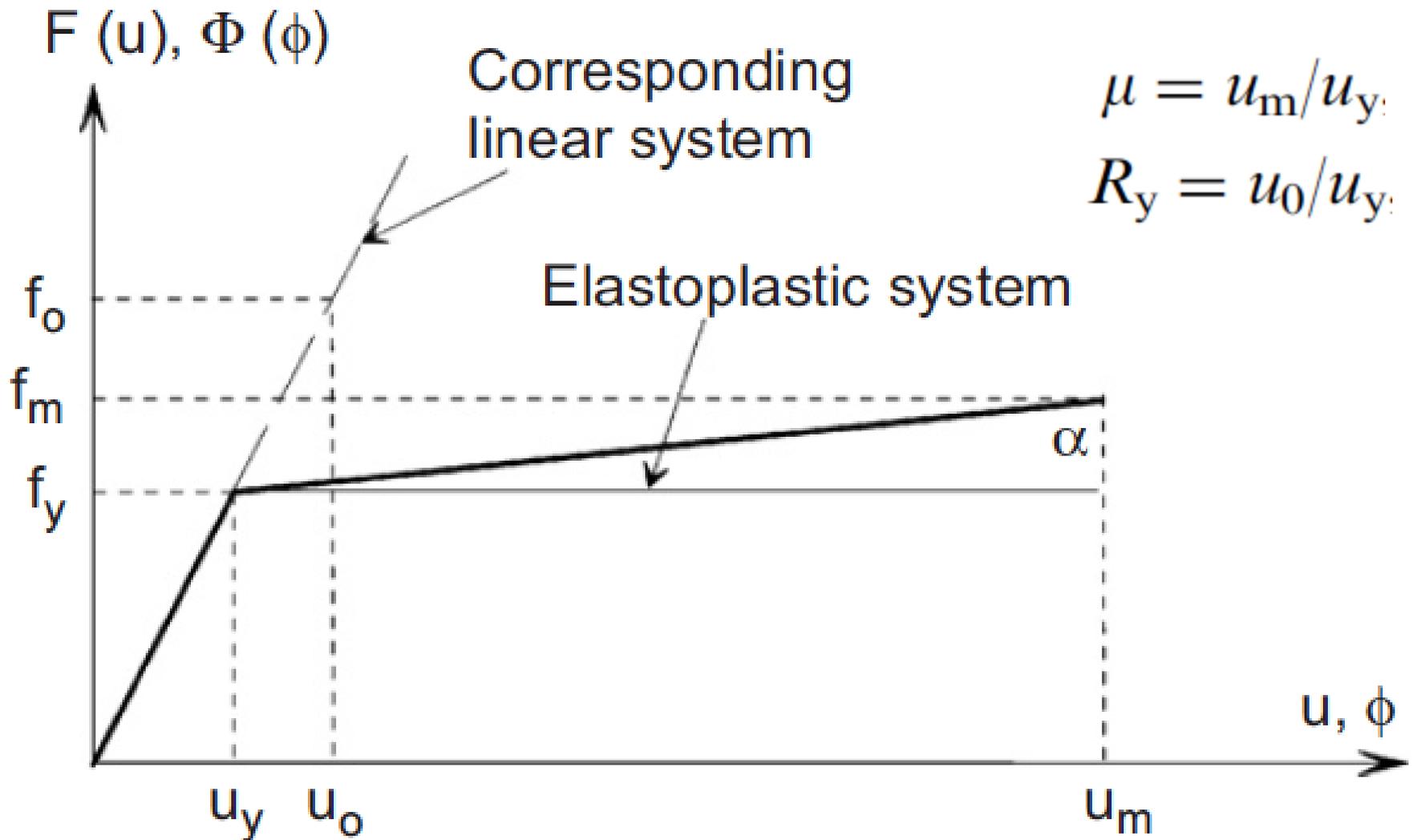
$$\text{StrikeWeight} = 1 - \text{DipWeight}$$



具不同破裂方向之斷層的應用方式

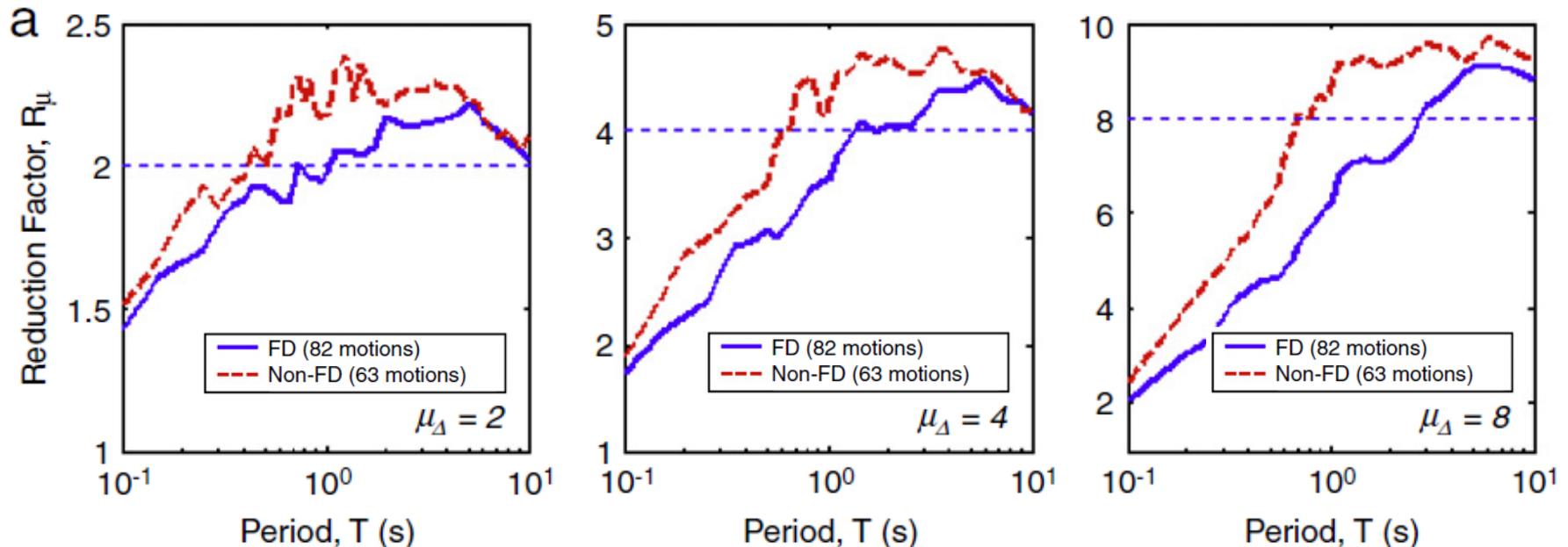


非彈性反應譜與強度折減係數



速度脈衝對非彈性反應譜的影響

- 速度脈衝會增加不同周期結構物的非彈性耐震需求
- 在相同的折減係數下，具速度脈衝的地震歷時會造成較大的結構損壞



結論 – I

■ 速度脈衝的特徵為何?

- 如何判定歷時是否具速度脈衝?
 - 利用速度脈衝指標 (Shahi and Baker, 2014) 可用來判定地震歷時是否具速度脈衝，但無法判定其造成的原因。
- 什麼情況下容易發生速度脈衝?
 - 當斷層破裂長度與寬度越大之時 (地震規模越大時)
 - 當工址臨近斷層破裂面之時
 - 當工址位於主要破裂前進方向前緣之時
- 速度脈衝是否發生在某特定方向?
 - 較容易發生在垂直斷層破裂線的方向，因此於結構分析時需依據結構與斷層的相對位置來評估速度脈衝輸入的方向性

結論 – II

■ 速度脈衝的特徵為何?

– 速度脈衝的週期如何訂定?

- 以擷取的速度脈衝歷時來訂定其週期 (不同的擷取方式會得到不同的結果)
 - Mavroeidis and Papageorgiou, 2003: 採用數值函數來訂定
 - Shahi and Baker, 2014: 採用小波母函數的中心頻率來訂定
- 部分研究以速度反應譜最大值對應的週期來訂定，但速度脈衝的週期不完全等同於速度反應譜峰值的週期，速度脈衝的週期大部分比速度反應譜峰值的週期要大
- 地震規模越大可能引致的速度脈衝其週期越長
- 大部分的速度脈衝週期都大於0.6秒

結論 – III

■ 近斷層效應對結構彈性耐震需求的影響為何?

- 速度脈衝會增加基本振動週期與速度脈衝週期相近之結構物的彈性耐震需求
- 不同研究對於考量斷層破裂方向性時對彈性反應譜預測結果的影響量仍有差異，原因可能來自於調整係數的定義與計算方式的差異
 - Shahi and Baker (2011)：當 T 等於 T_p 時的放大倍率約為3倍
 - Shahi and Baker (2013)：當 T 等於 T_p 時的放大倍率約為2倍
 - Bayless and Somerville (2013)：僅對週期大於 0.5 sec 的結構有影響，臨近斷層區域的放大倍率約為0.8~1.3倍
- 未來需要發展考量近斷層效應的地震動模型

■ 近斷層效應對結構非彈性耐震需求的影響為何?

- 速度脈衝會增加不同周期結構物的非彈性耐震需求
- 在相同的折減係數下，具速度脈衝的地震歷時會造成較大的結構損壞
 - 近斷層工址之設計折減係數需要特別考量

參考文獻

- Mavroeidis, G.P. and Papageorgiou A.S. (2003). “A Mathematical Representation of Near-Fault Ground Motions,” *Bulletin of the Seismological Society of America* ; 93 (3): 1099–1131.
- Baker J.W. (2007). "Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97 (5), 1486-1501.
- Shahi, S.K. and Baker, J. W. (2011). “An empirically calibrated framework for including the effects of near-fault directivity in probabilistic seismic hazard analysis.” *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(2), 742-755.
- Shahi, S.K. and Baker, J.K. (2013). “An efficient algorithm to identify strong velocity pulses in multi- component ground motions,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(5), 2456–2466, 2014
- Spudich, P., Bayless, J. R., Baker, J. W., Chiou, B. S.-J., Rowshandel, B., Shahi, S. K., and Somerville, P. G., 2013. Final Report of the NGA-West2 Directivity Working Group, Pacific Earthquake Engineering Research Center Report PEER-2013/09, Berkeley, CA, 130 pp
- Gillie, J.L. Rodriguez-Marek, A., McDaniel, C. (2010). “Strength reduction factors for near-fault forward-directivity ground motions,” In *Engineering Structures*, Volume 32, Issue 1, 2010, Pages 273-285

Thank You for Your Attention !!

Questions ?