NARLabs
國家實驗研究院

機率式
土壤液化潛勢評估與應用

葉錦勳 博士
震災模擬組組長

國家地震工程研究中心
National Center for Research on Earthquake Engineering

簡報大綱

- 前言
- 土壤液化評估模式
- 震源機率模型
  - 機率式地震危害度分析與風險評估的基礎
- 推測地震事件
  - 震災境況模擬與損失模擬資料庫的震源參數設定
  - 地震早期損失評估與機率式地震風險評估有不同考量因素
- 機率式土壤液化/地震風險評估流程
- 土壤液化潛勢分析案例
- 結語

NCREE Commitment Passion Innovation

前言

NCREE
Commitment Passion Innovation

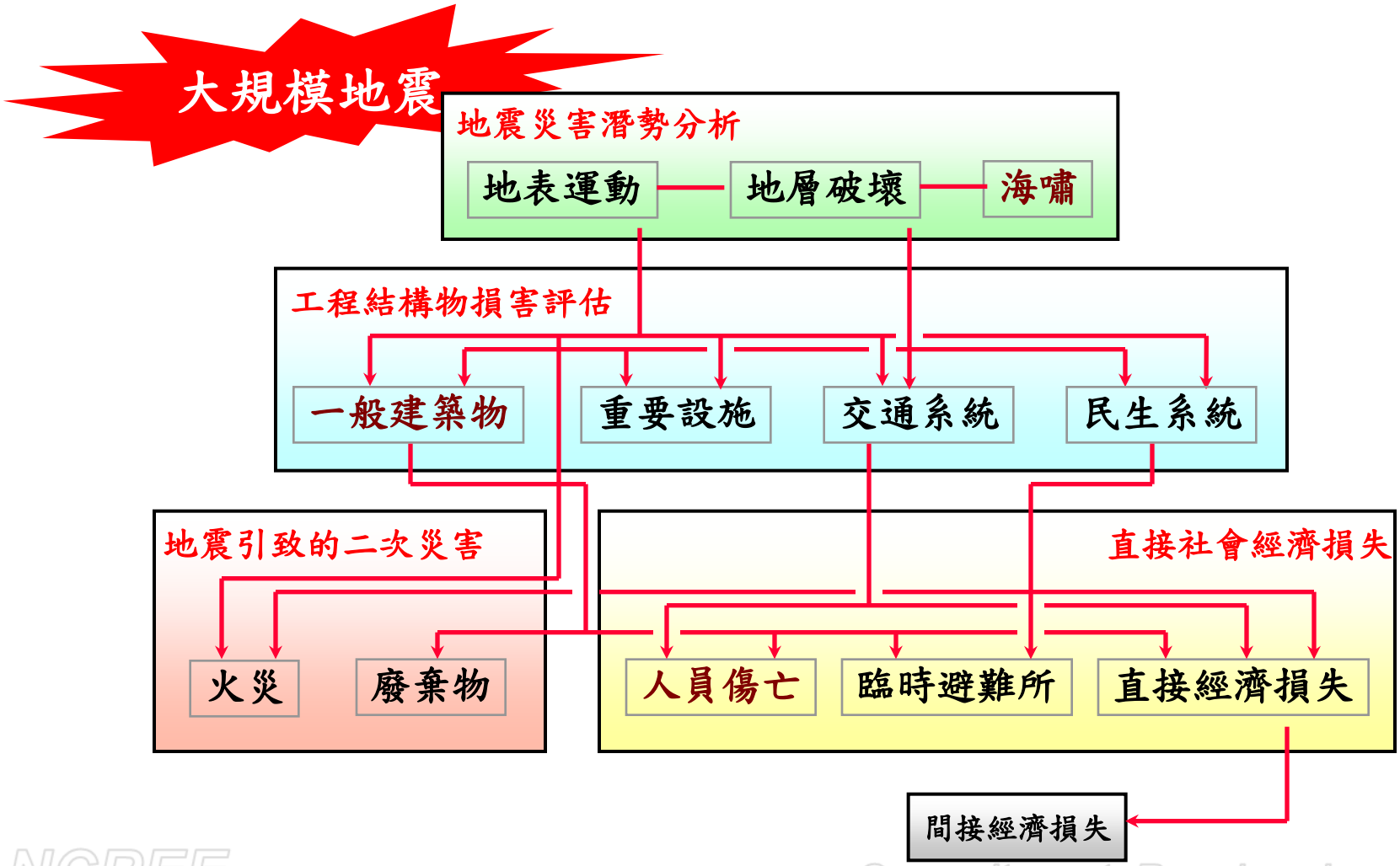
地震引致的致災因子(災害潛勢)

- 錯動斷層兩側之土層變形，造成結構物基礎不均勻沉陷，或地下構造物因變形而破壞
- 地表強烈震動時，因上部結構之側向慣性力造成彎矩或剪力破壞，或橋梁發生落橋現象
- 飽和鬆軟土層，因反覆震動可能發生土壤液化現象，因承載力不足可造成上部結構傾倒損害
- 山崩、土石滑落，除影響附近結構物，也可能造成堰塞湖而引致二次災害
- 露出地表之海底斷層錯動，可能造成海嘯

NCREE Commitment Passion Innovation

震災境況模擬技術—TELES

資料庫建置、分析模式與參數校正、整合應用軟體研發



NCREE
Commitment Passion Innovation

運用震災境況模擬技術的必要性

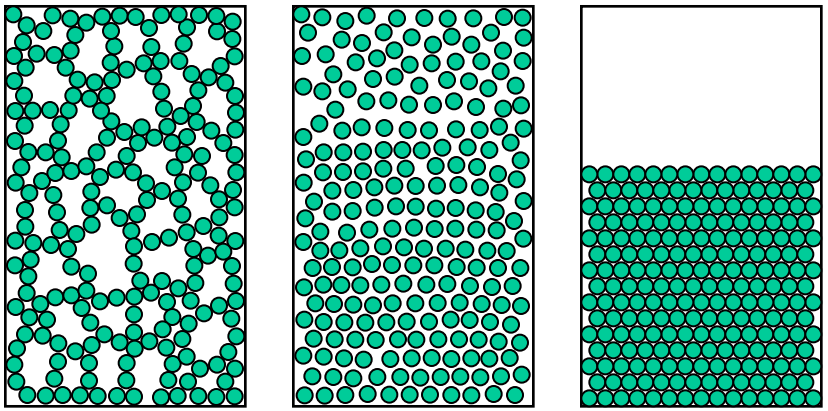
- 地震風險評估需兼顧地震災害潛勢分析、工程結構的易損性、風險暴露的脆弱度、數量和分佈等資訊
- 災害性地震不常發生，沒有足夠的歷史災情資料進行統計分析；歷史久遠的地震災情調查結果常無法反應社會現況
- 影響損害、損失或傷亡的因素眾多，需倚賴震災境況模擬技術方能獲得較精確合理的推估值
- 地震災害潛勢評估模式包含PGA以外的變因，譬如土壤液化、山崩潛勢均與地震規模有關，傳統機率式地震危害度分析需微幅修改

NCREE Commitment Passion Innovation

土壤液化評估模式

NCREE
Commitment Passion Innovation

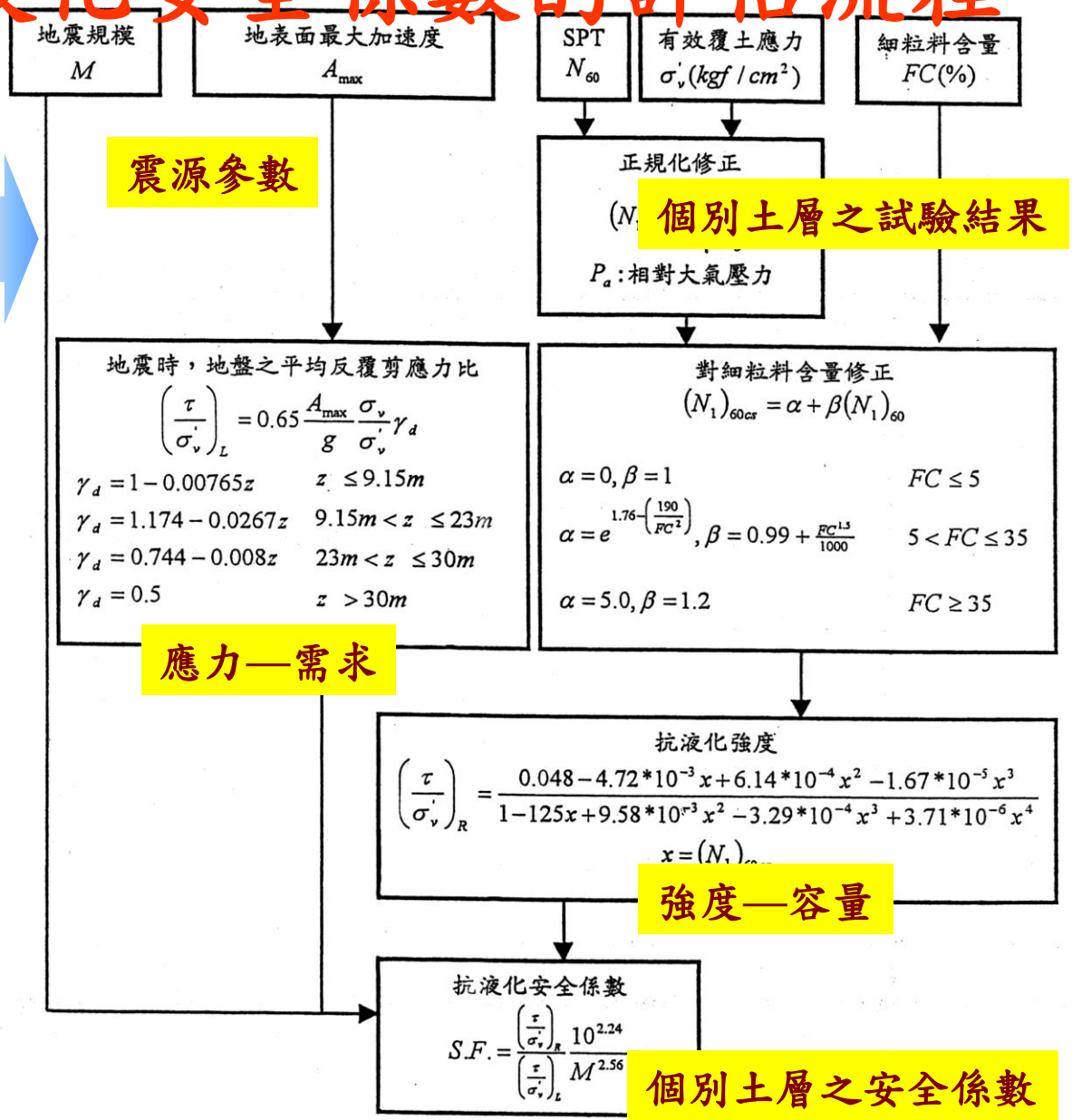
土壤液化現象之示意圖



Stage 1 液化前　Stage 2 液化中　Stage 3 液化後

各土層之抗液化安全係數的評估流程

抗液化安全係數之
修正 Seed SPT-N 評估法
(NCEER, 1997)



Tokimatsu, K. and Yoshimi, Y. (1983), "Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT N-value and Fines Content, " Soils and Foundations, JSSMFE, Vol. 23, No. 4, pp.56-74.

日本道路協會 (1996)，道路橋示方書同解說，V耐震設計篇

工址之土壤液化潛能指數 (Iwasaki, 1982)

$$P_L = \int_0^{20} F(z)w(z)dz$$

$$F(z) = \begin{cases} 1 - F_L(z) & \text{when} \quad F_L(z) < 1.0 \\ 0 & \text{when} \quad F_L(z) \geq 1.0 \end{cases}$$

抗液化安全係數 $= \frac{R(z)}{L(z)}$

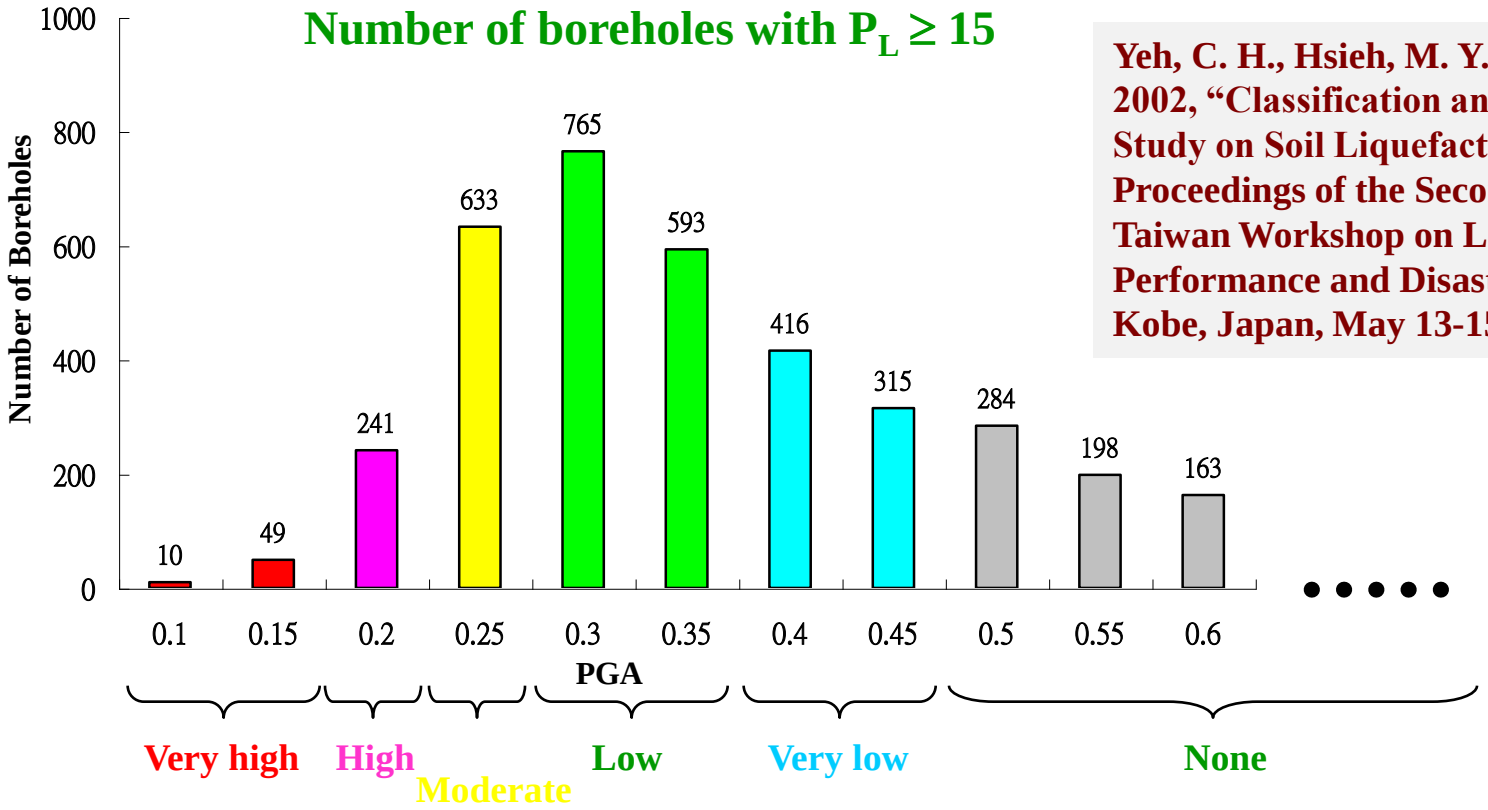
$$w(z) = 10 - 0.5z$$

與土層深度相關的權重函數

- 通常用於推估液化機率和其嚴重性
- 當$P_L \geq 15$時，土壤液化機率高且可能嚴重液化
- 當$P_L \leq 5$時，土壤液化機率低或可能不會液化

NCREE Commitment Passion Innovation

土壤液化敏感類別之分類定義

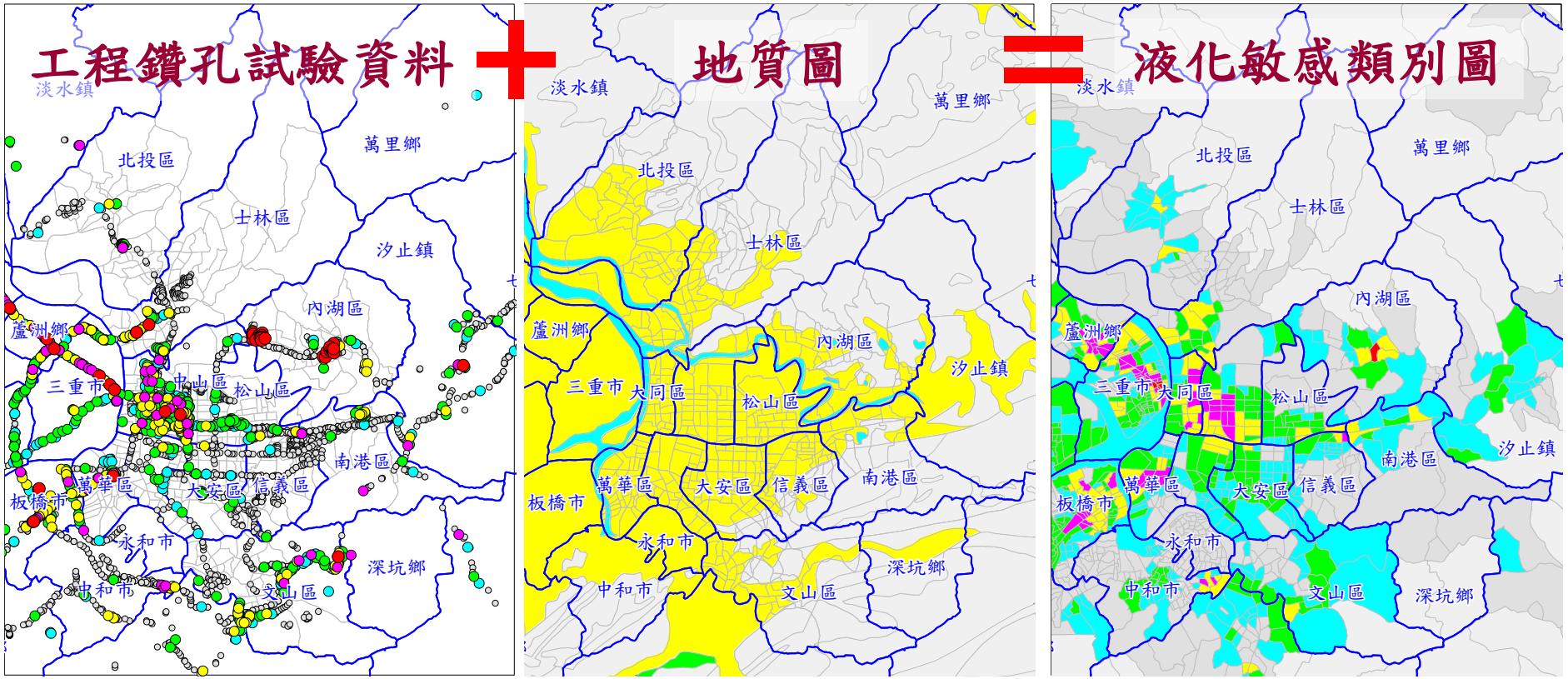


Yeh, C. H., Hsieh, M. Y., and Loh, C. H., 2002, "Classification and Parametric Study on Soil Liquefaction Potential", Proceedings of the Second Japan-Taiwan Workshop on Lifeline Performance and Disaster Mitigation, Kobe, Japan, May 13-15.

- Calculate P_L under the same conditions
  - M = 7.5 & d_w = 1.5 meters
- PGA = 0.1g, 0.15g, 0.2g, 0.25g, 0.3g, 0.35g, 0.4g, 0.45g, 0.5g, 0.55g, 0.6g

NCREE Commitment Passion Innovation

臺北市之土壤液化敏感類別圖



- Very high
- High
- Moderate
- Low
- Very low
- None

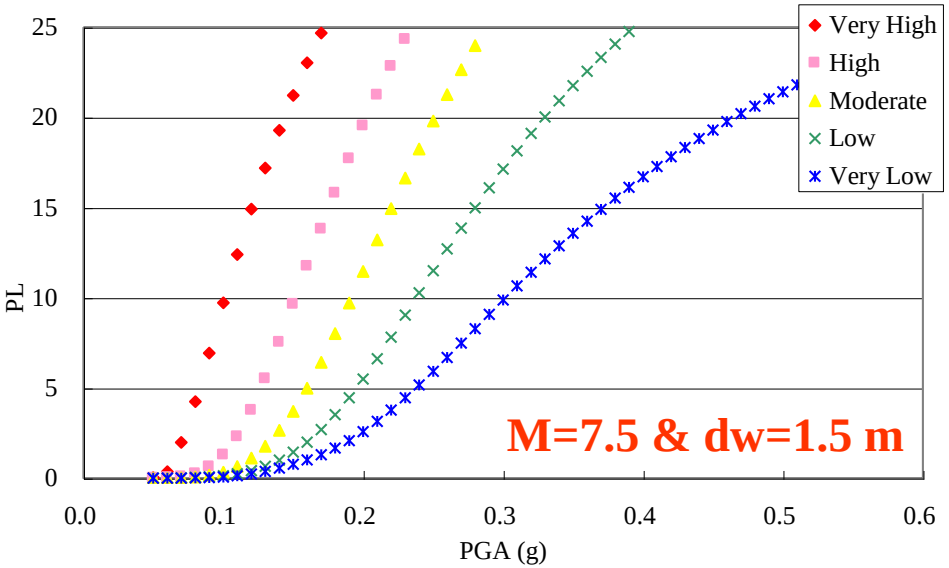
- Rock
- Sediment, not sensitive
- Sediment, sensitive
- Water

Buffer region
➔LSC map around BH

Weighted sum
➔LSC map in tract

NCREE
Commitment Passion Innovation

各液化敏感類別之液化潛能指數推估



Category	α_i	β_i
Very High	227.52	-13.63
High	188.30	-18.45
Moderate	157.35	-20.51
Low	103.02	-14.95
Very Low	66.95	-10.64

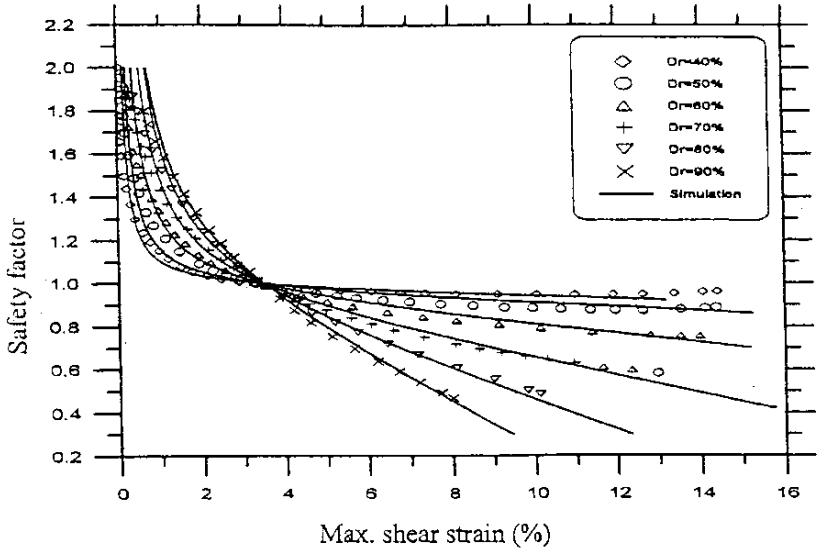
$$(P_L)_i = \alpha_i f(M) g(d_w)(\mathrm{PGA}) + \beta_i$$

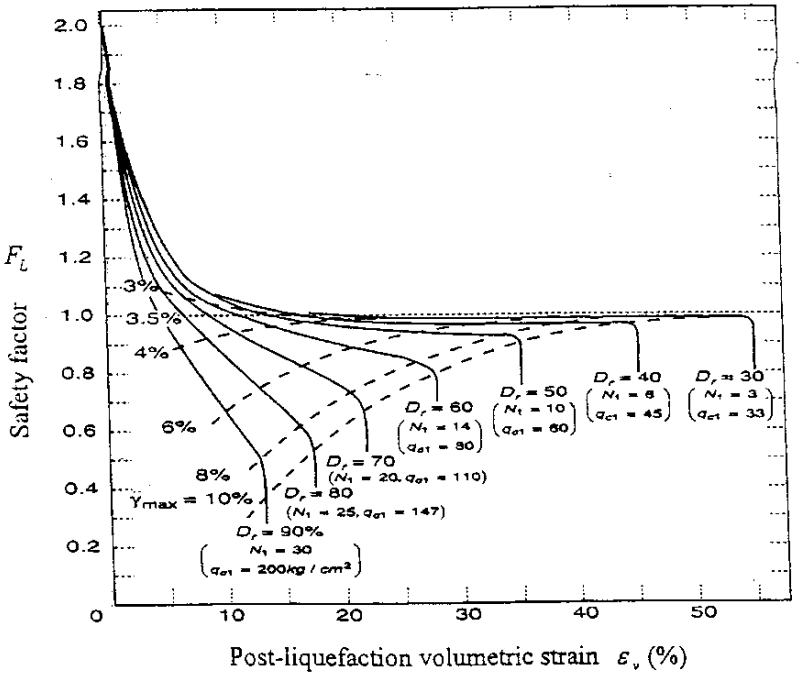
$$f(M) = 0.03528M^2 - 0.18549M + 0.40688$$

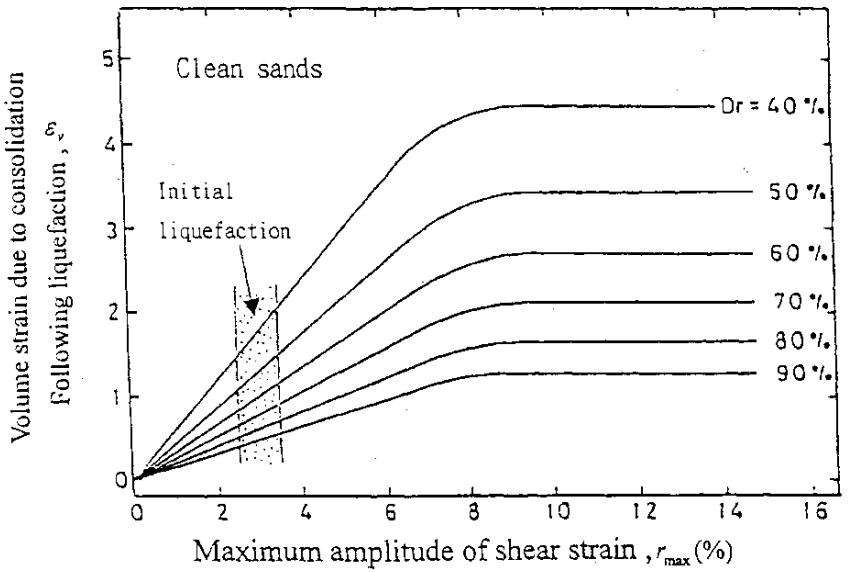
$$g(d_w) = 0.0001915d_w^{\ 4} - 0.005145d_w^{\ 3} + 0.053452d_w^{\ 2} - 0.27583d_w + 1.3105$$

NCREE
Commitment Passion Innovation

土壤液化時引致的震陷量推估







Ishihara and Yoshimi (1992)

different layer / Dr (relative density)

- **safety factor ➔ max. shear strain**
- **max. shear strain ➔ volume strain**

total influence

- **volume strain ➔ 1-D strain**
- **integration ➔ total settlement**

© Advanced Design Innovation

各液化敏感類別之液化震陷量推估

$$S = \bar{S}_i \cdot \int_0^A \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i x} e^{-\frac{[\ln(x/m_i)]^2}{2\sigma_i^2}} dx$$

$$= \bar{S}_i \cdot \Phi\left[\frac{\ln(A/m_i)}{\sigma_i}\right]$$

$$m_i = \mu_i \cdot \bar{f}(M) \cdot \bar{g}(d_w)$$

$$\sigma_i = \lambda_i \cdot \bar{h}(d_w)$$

$$\bar{f}(M) = 0.1231M^2 - 2.2052M + 10.5954$$

$$\bar{g}(d_w) = -0.007188d_w^2 + 0.145195d_w + 0.7919$$

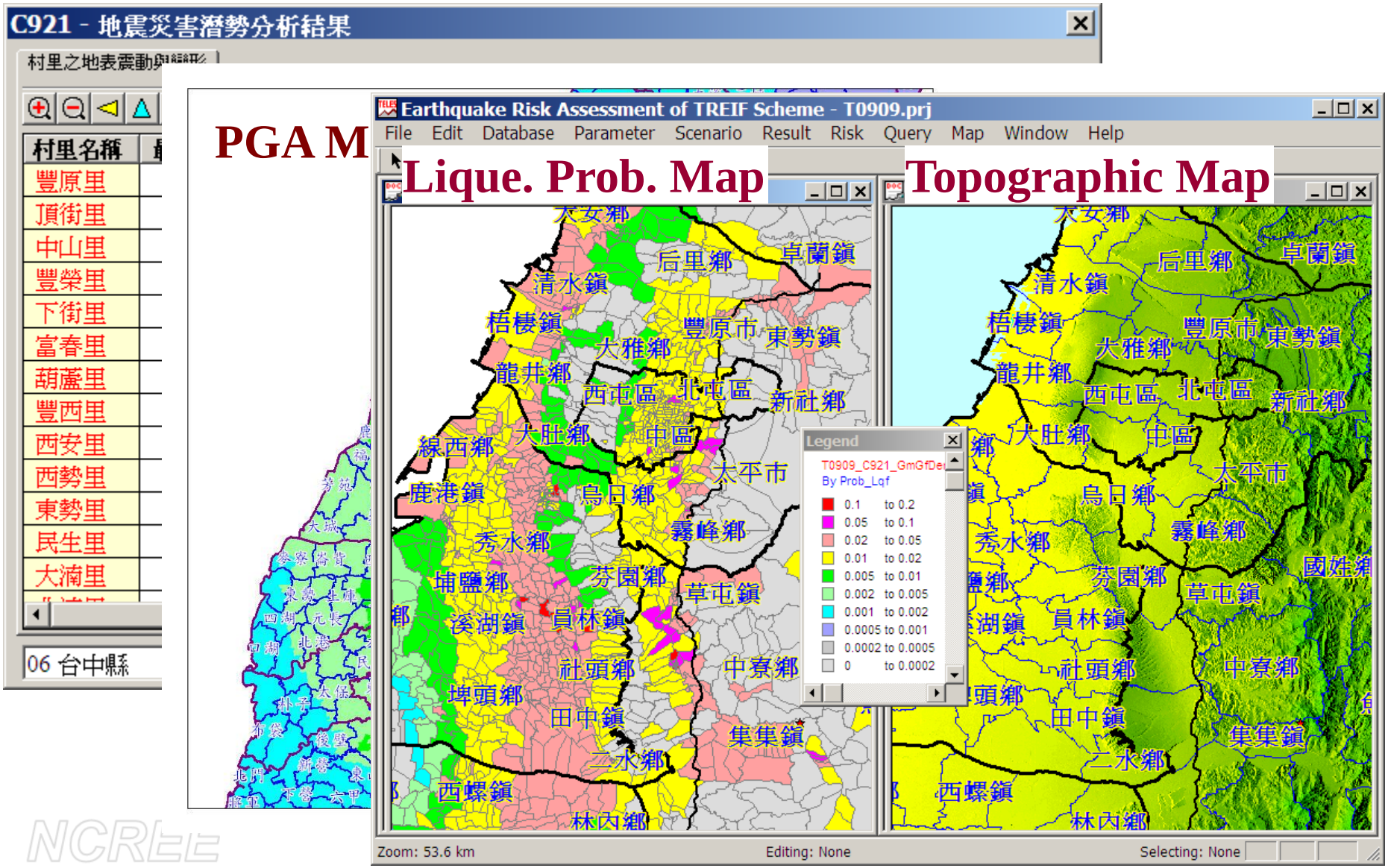
$$\bar{h}(d_w) = 0.003208d_w^2 - 0.042231d_w + 1.0611$$

Yeh, C. H., Hsieh, M. Y., and Loh, C. H., 2002, "Estimations of Soil Liquefaction Potential and Settlement in Scenario Earthquakes", Proce. of the Canada-Taiwan National Hazards Mitigation Workshop, July 17-19, Ottawa, Canada.

Category	$\bar{S}_i$ (cm)	μ_i(g)	λ_i
Very High	52.00	0.0872	0.4522
High	50.22	0.1292	0.3657
Moderate	46.21	0.1613	0.3433
Low	35.89	0.1875	0.3430
Very Low	25.66	0.2104	0.3764

NCREE Commitment Passion Innovation

集集地震引致的災害潛勢推估結果



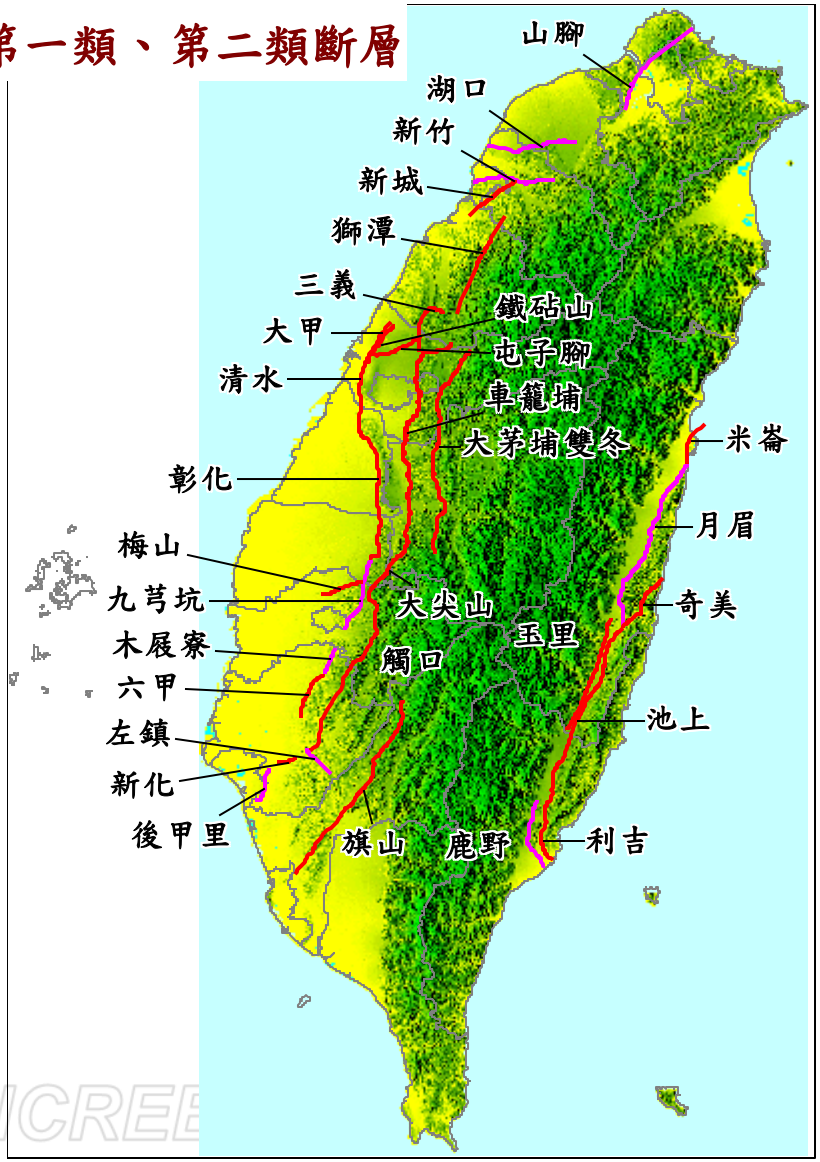
震源機率模型

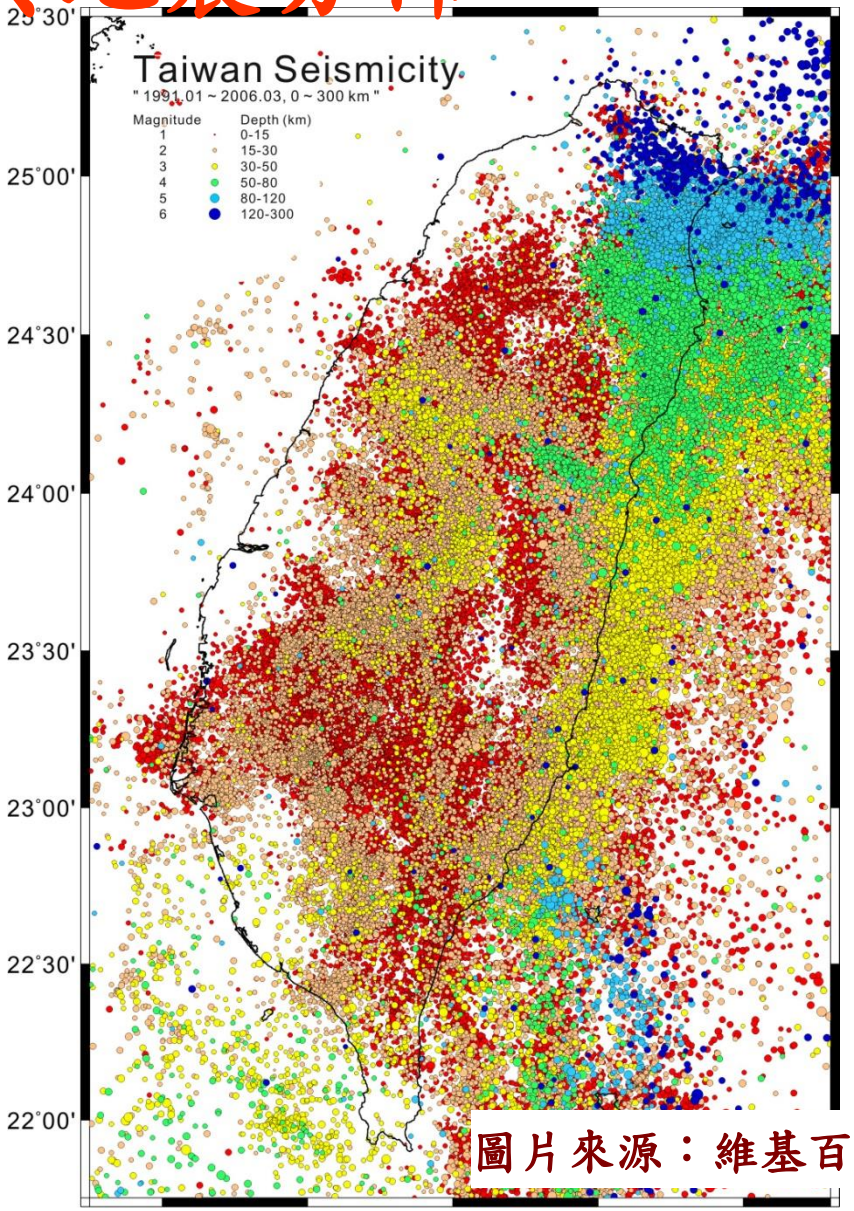
機率式地震危害度分析與風險評估的基礎

NCREE
Commitment Passion Innovation

台灣地區活動斷層與地震分佈

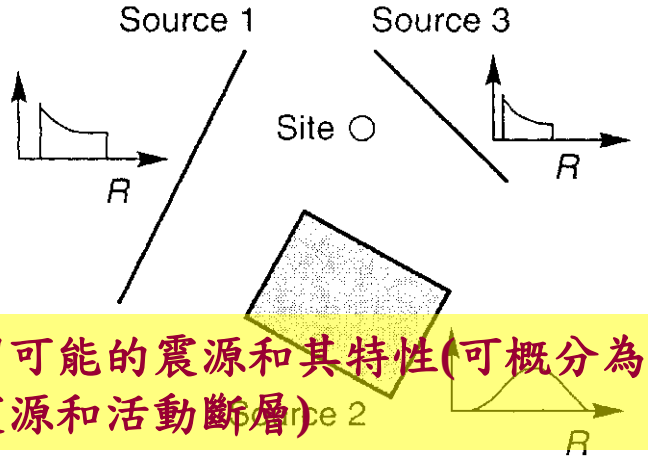
第一類、第二類斷層





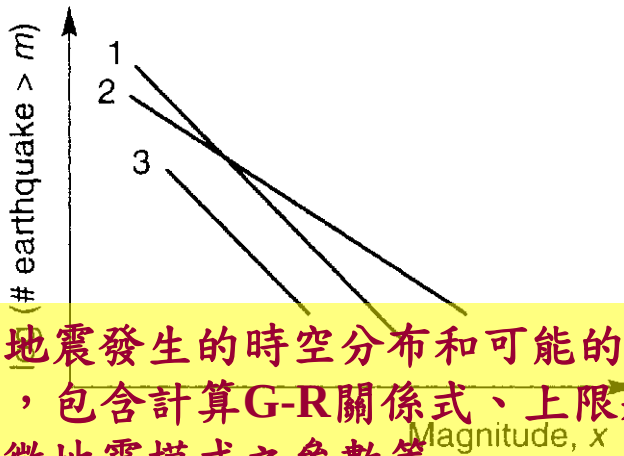
圖片來源：維基百科

機率式地震危害度分析之流程/步驟



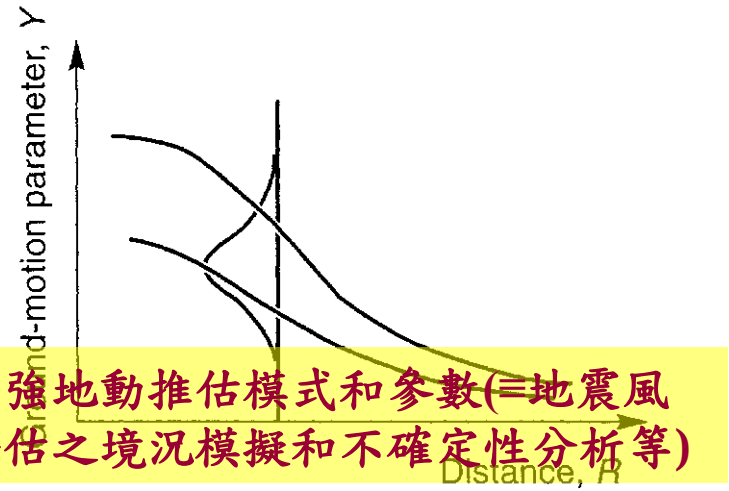
識別可能的震源和其特性(可概分為區域震源和活動斷層)

STEP 1



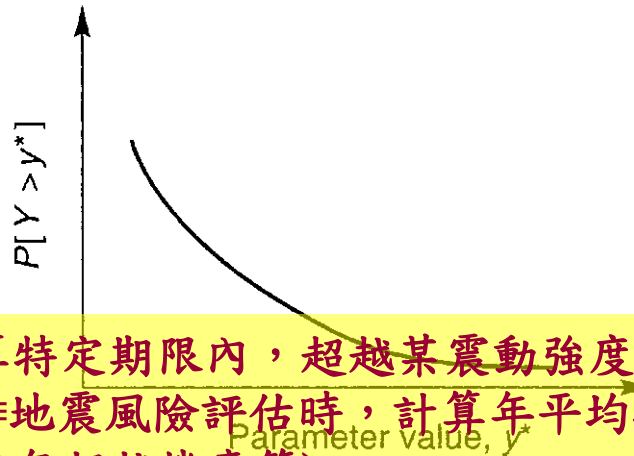
未來地震發生的時空分布和可能的規模大小，包含計算G-R關係式、上限規模、特徵地震模式之參數等

STEP 2



指定強地動推估模式和參數(=地震風險評估之境況模擬和不確定性分析等)

STEP 3



計算特定期限內，超越某震動強度的機率(=地震風險評估時，計算年平均損失和其年超越機率等)

STEP 4

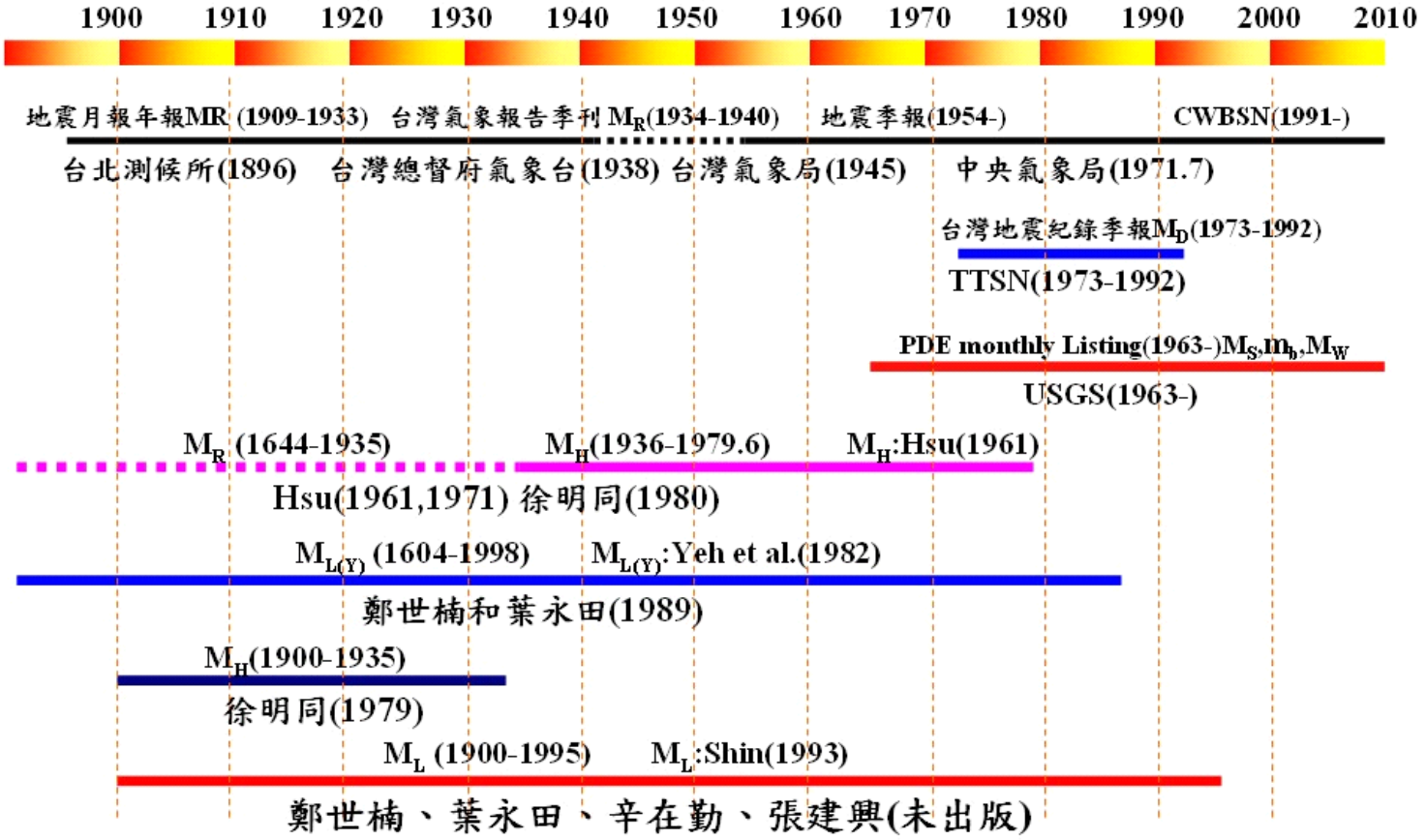
震源分類、適用之震源機率模型

- 區域震源
  - 位置與方向不確定；以歷史地震目錄和地震地質構造等進行震源分區
  - 常假設滿足截切G-R關係式，並以穩態波松隨機程序模擬，需推估地震規模上限、不同地震規模之年平均發生率等
- 活斷層震源
  - 已知斷層位置、走向、傾角等；根據古地震研究和野外調查，概分第一類、第二類、存疑性
  - 依時間或規模可預測之特徵地震模型，需上次發生錯動時間、特徵地震規模、平均再現期等

NCREE Commitment Passion Innovation

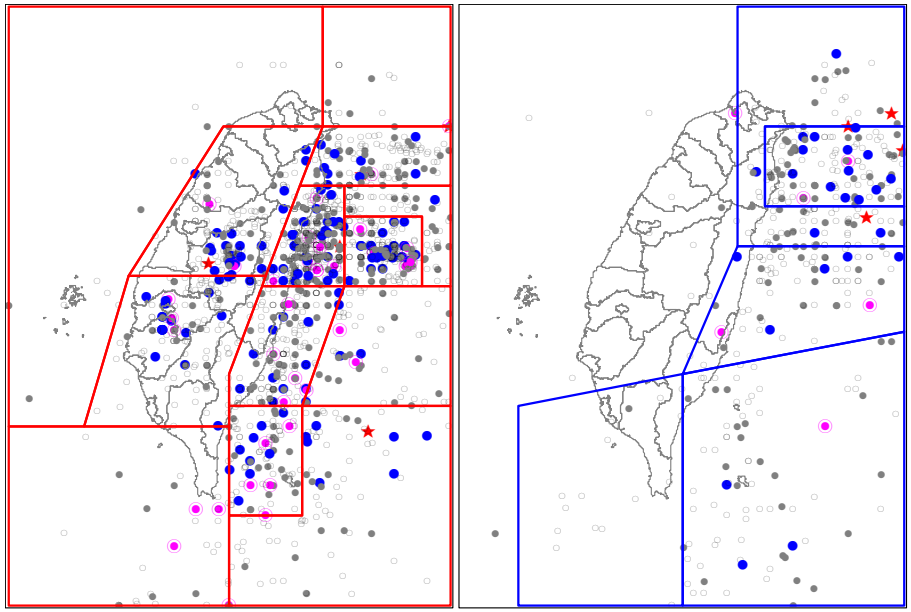
台灣地區主要地震目錄

(涵蓋時間、採用之地震規模定義的比較)



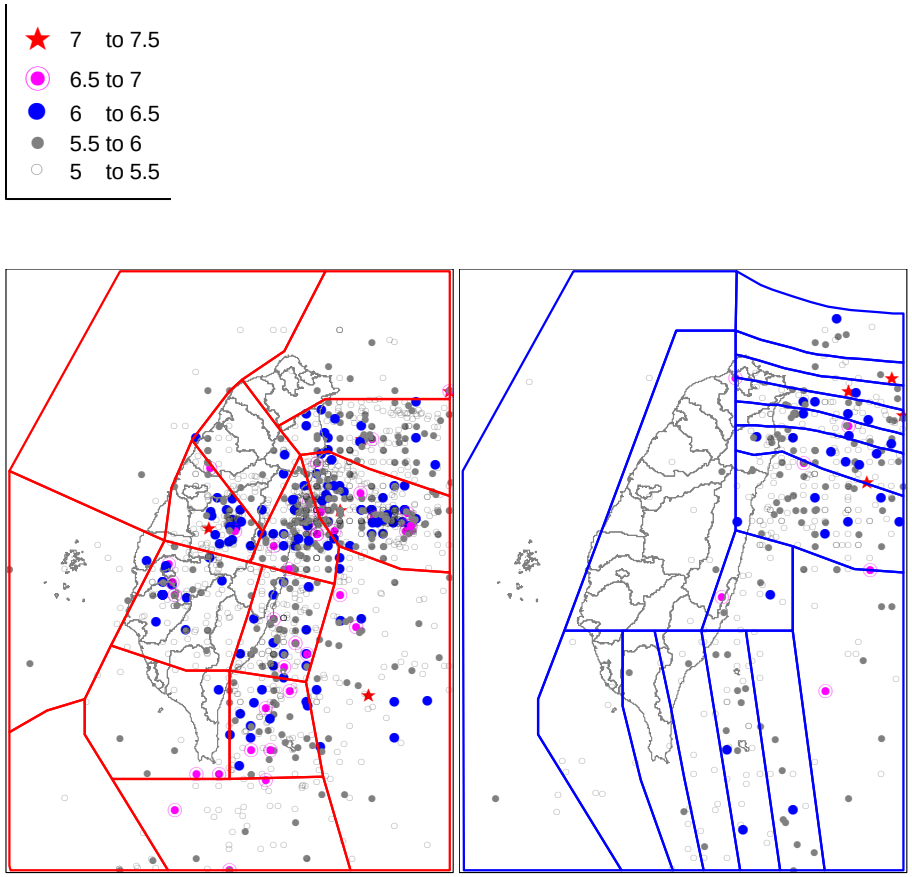
- 統一地震目錄所用之地震規模的定義
- 移除多餘或重複的地震事件
- 地震規模大於7.0的地震事件重新定位

歷史地震 / 區域震源 / 震源分區方式



(淺震源)　　(深震源)

羅俊雄、簡文郁等研提之震源分區

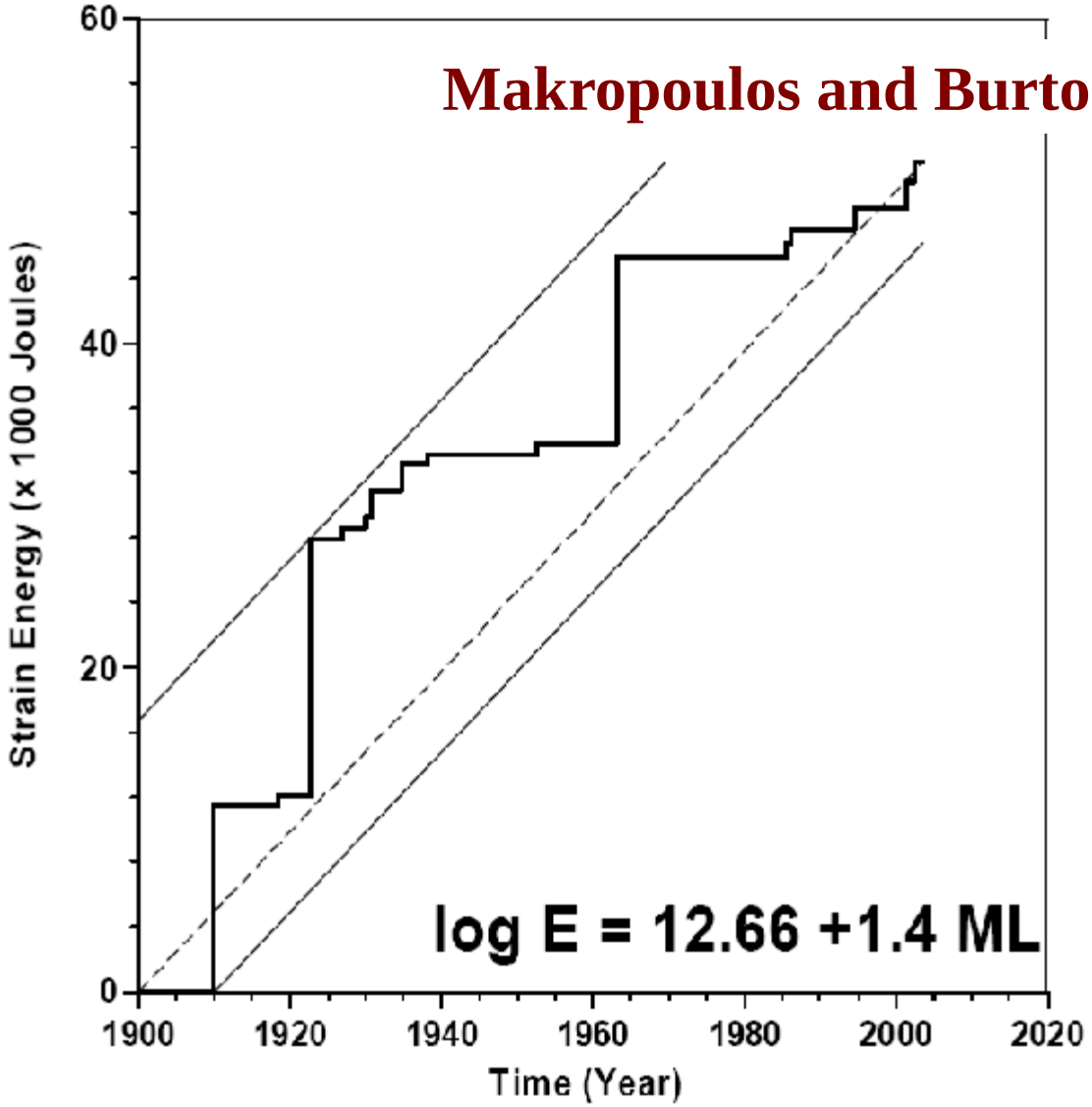


(淺震源)　　(深震源)

李錫堤、鄭錦桐等研提之震源分區

NCREE
Commitment Passion Innovation

推估各震源分區的上限規模m_u



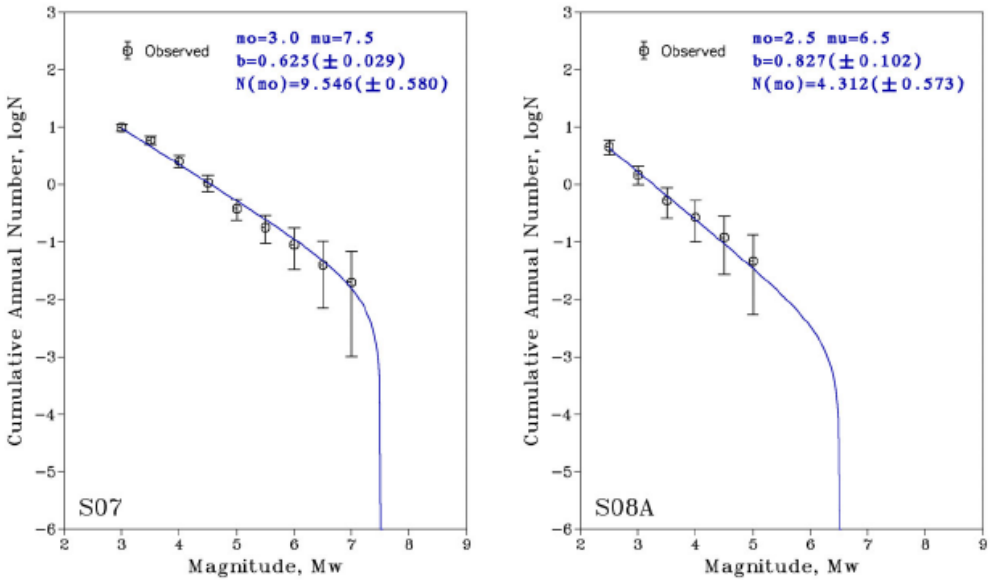
G-R關係式 和 規模的機率密度函數

Gutenberg and Richter (1944)

$$\ln \dot{N}(m) = \alpha - \beta \cdot m$$

$$N(m) = N(m_0) \cdot e^{-\beta(m-m_0)}$$

$$\beta = b \cdot \ln 10$$



Cornell and Van Marke (1969)

CDF

$$F_M(m) = 1 - \frac{N(m) - N(m_u)}{N(m_0) - N(m_u)} = \frac{1 - e^{-\beta(m-m_0)}}{1 - e^{-\beta(m_u-m_0)}}$$

for $m_0 \le m \le m_u$

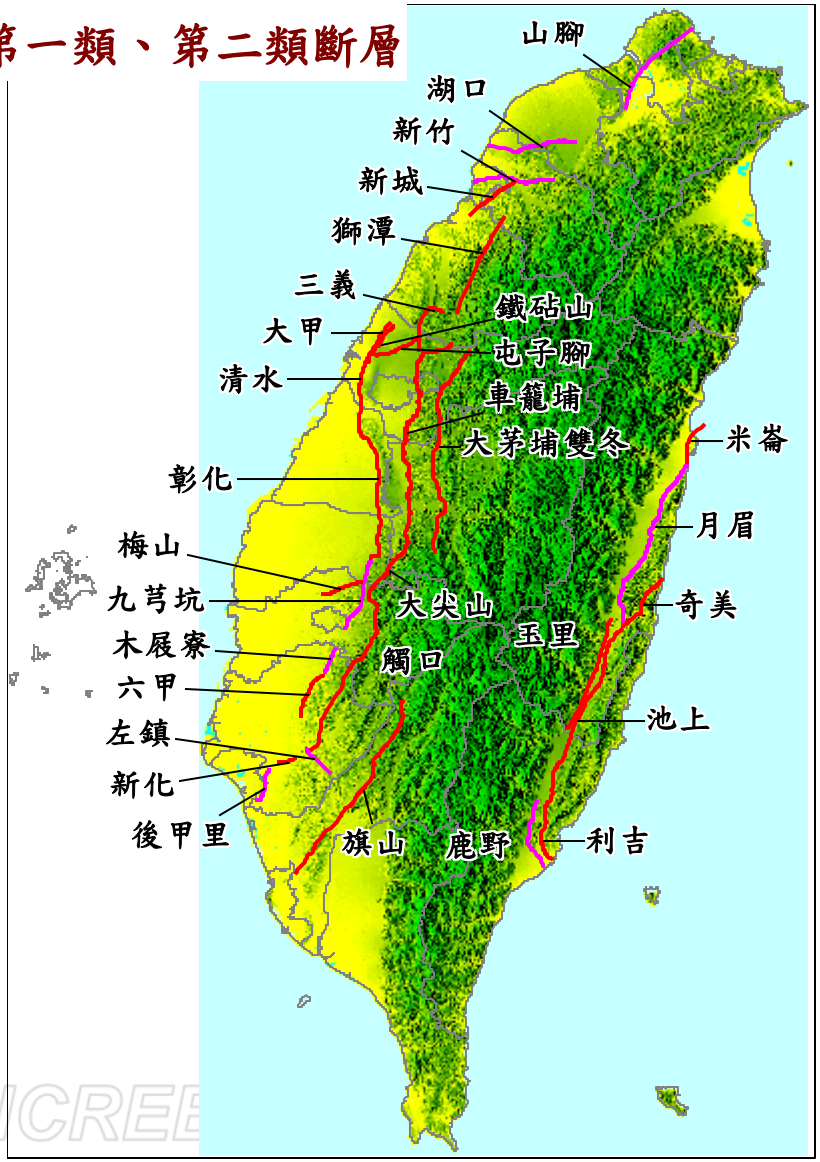
PDF

$$f_M(m) = \frac{\beta \cdot e^{-\beta(m-m_0)}}{1 - e^{-\beta(m_u-m_0)}}$$

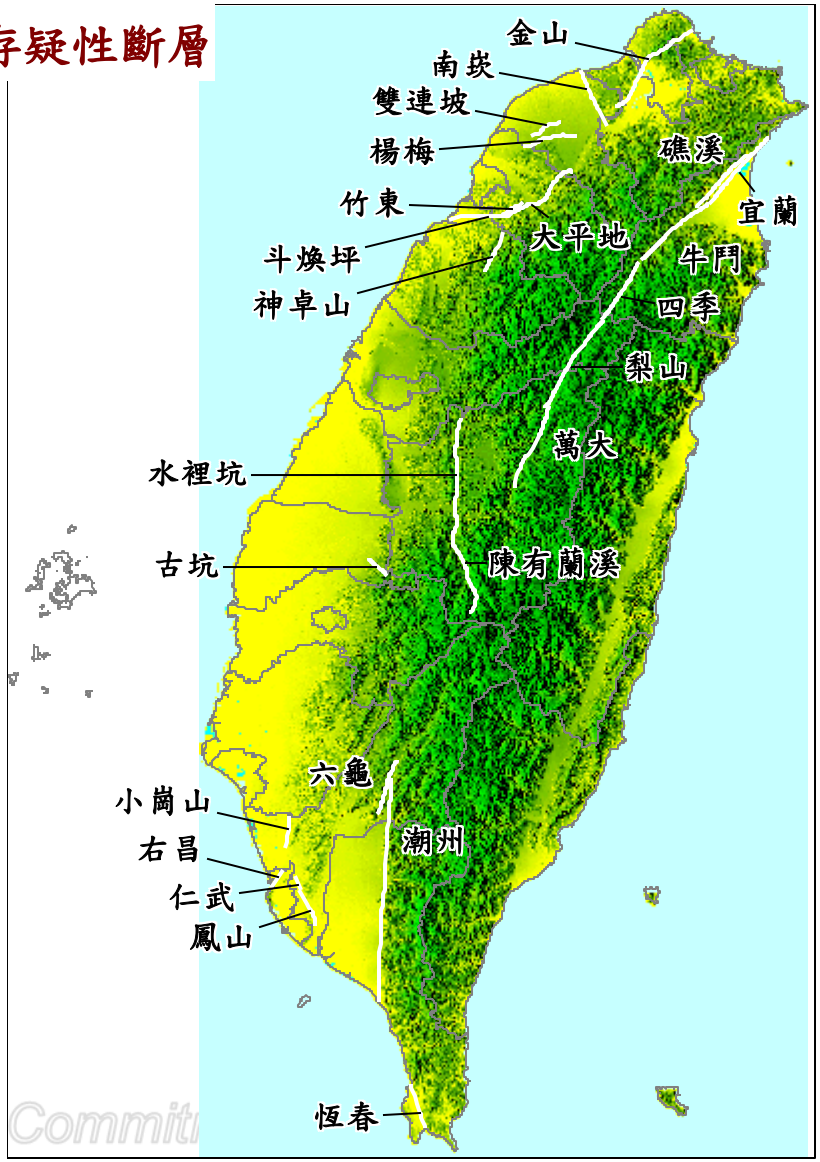
NCREE Commitment Passion Innovation

台灣地區活斷層分佈

第一類、第二類斷層



存疑性斷層



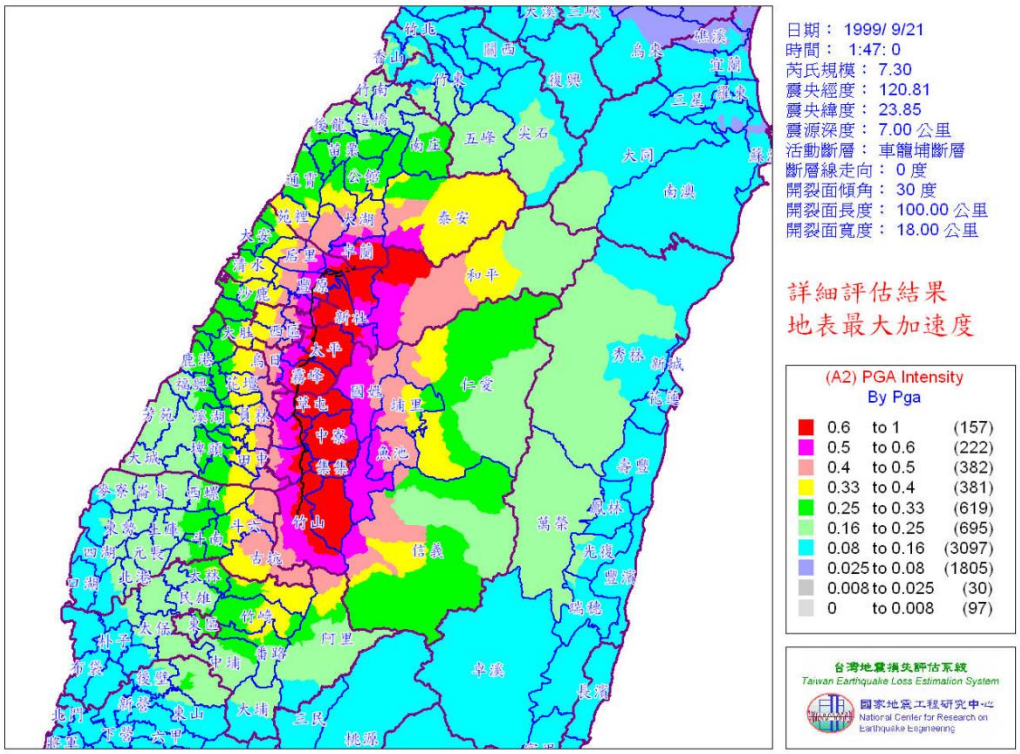
推測地震事件

震災境況模擬與損失模擬資料庫的
震源參數設定
地震早期損失評估與機率式地震風險評估
有不同考量因素

NCREE
Commitment Passion Innovation

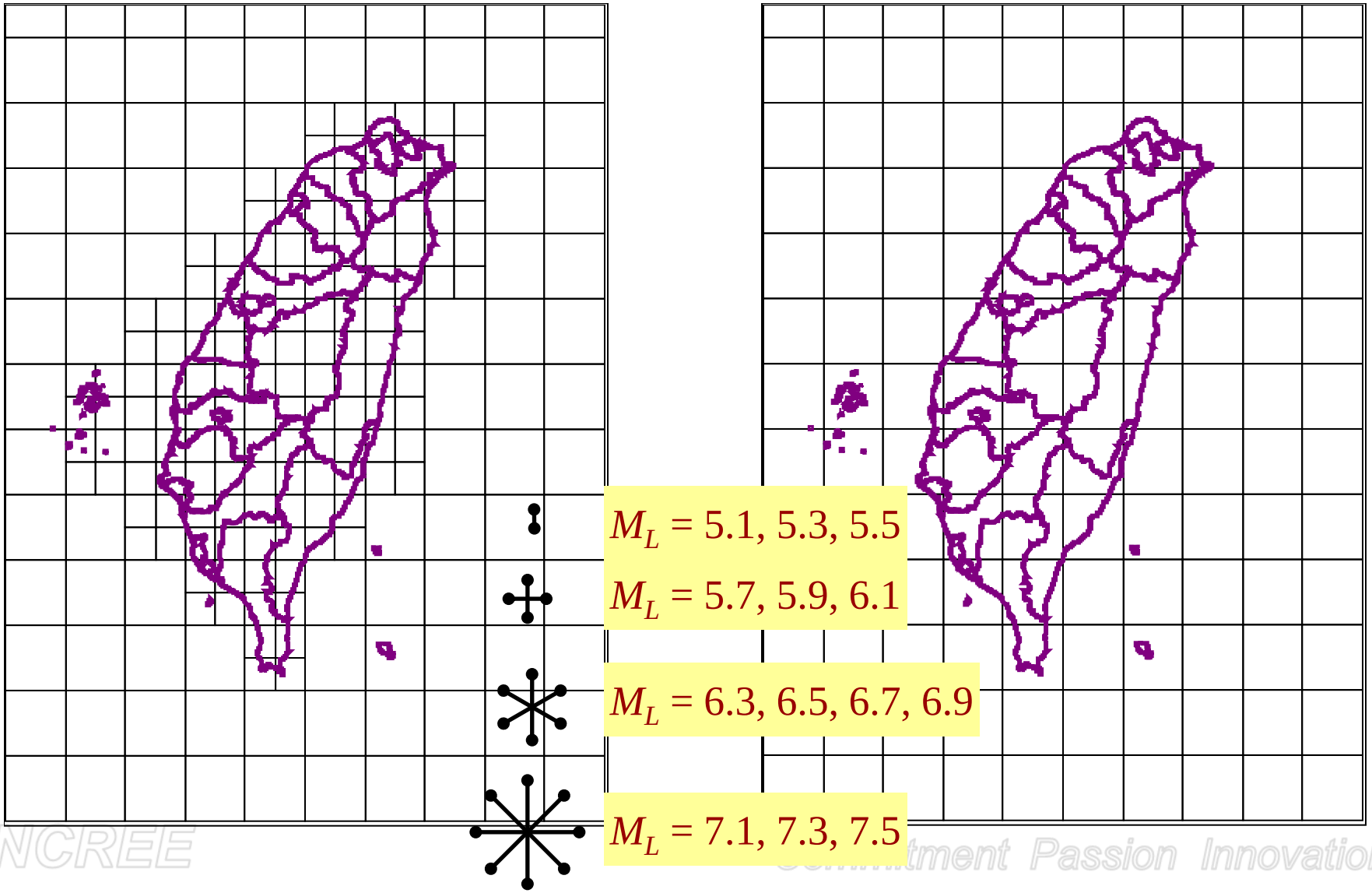
構造性地震之震源描述與參數設定

- 地震事件的日期、時間
- 地震規模、震央位置、震源深度
- 斷層破裂面的幾何參數
  - 長度、寬度、方向、傾角
- 斷層破裂機制
  - 正斷層
  - 逆斷層
  - 平移斷層



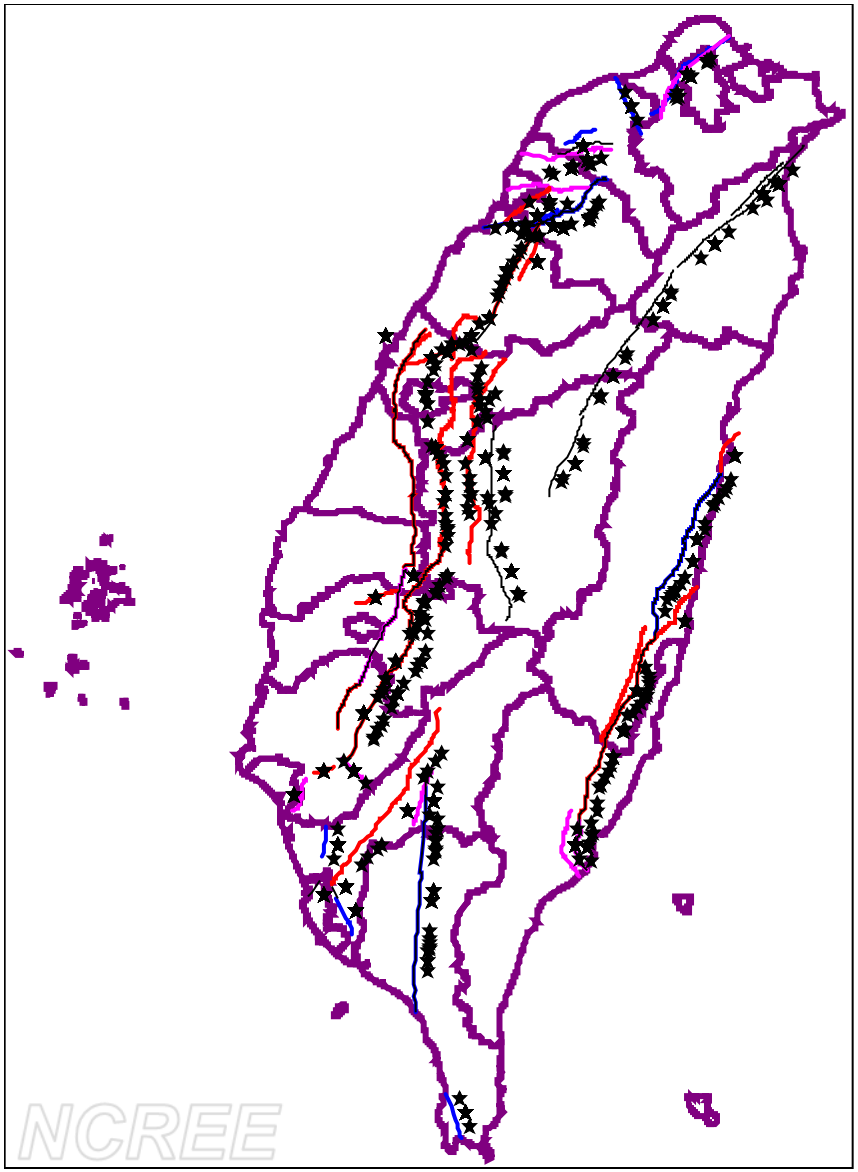
NCREE

網格化區域震源之推測地震事件



NCREE
Commitment Passion Innovation

活斷層震源之推測地震事件



中央地質調查所(CGS) 42條
中央大學(Lee et al) – CGS 12條

第一、第二類斷層 30條
存疑性斷層 24條
連結數條分段之斷層系統 8條

共768個活斷層震源引致的
推測地震事件

NCREE
Commitment Passion Innovation

機率式土壤液化/地震風險評估流程

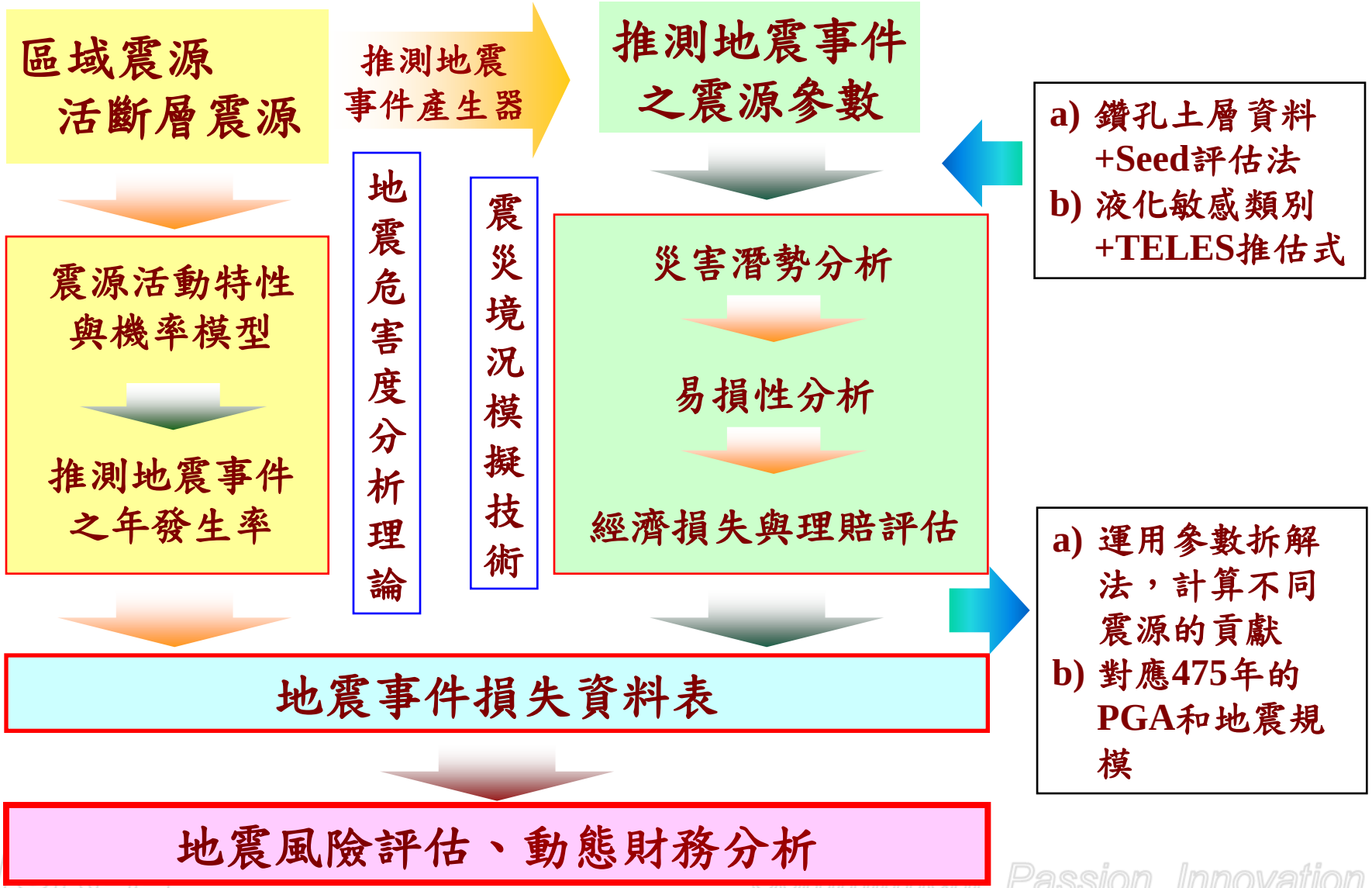
NCREE
Commitment Passion Innovation

機率式地震風險評估的步驟

- 識別震源及其活動特性，模擬未來可能地震的時空分佈，建置「推測地震事件」資料庫
- 依「震源機率模型」，計算每一推測地震事件的年平均發生率
- 以「震災境況模擬」技術，進行推測地震事件之境況模擬，推估地震引致的災害潛勢、工程結構物損害及損失、二次災害、社會經濟衝擊等，建置「地震事件損失資料表」
- 運用蒙地卡羅模擬，依機率和統計理論，計算震動、液化、損害、損失、傷亡等的年平均值、單一事件最大值、年超越機率等風險指標

NCREE Commitment Passion Innovation

機率式地震風險評估的流程示意圖



地震事件損失資料表

ID	Source Parameters	ν	L	σ	X
1	$M_1, E_1, N_1, d_1, l_1,$	ν_1	L_1	σ_1	X_1
2	$M_1, E_1, N_1, d_1, l_1,$	ν_2	L_2	σ_2	X_2
…			…		
j	$M_j, E_j, N_j, d_j, l_j,$	ν_j	L_j	σ_j	X_j
…			…		
J	$M_J, E_J, N_J, d_J, l_J, \theta_J$	ν_J	L_J	σ_J	X_J

離散之推測地震事件

震源機率模型

震災境況模擬技術

資料與分析模式的不確定性

人員、設施、管線等資料庫

NCREE Commitment Passion Innovation

地震風險評估結果與其應用

- 重要的地震風險評估結果
  - 年平均損失(AAL)與其標準差
  - 單一事件之可能最大損失(PML)
  - 損失的年超越機率曲線
- 可能之實務應用
  - 土壤液化潛勢評估
  - 鐵、公路橋梁等重要設施之耐震補強效益與排序
  - 篩選縣市可能最大地震、研擬災害防救計畫
  - 地震保險與再保險費率的計算與純保費分配

NCREE Commitment Passion Innovation

年平均損失(AAL)與標準差

震源機率模型

$$L = \sum_j L_j \cdot \nu_j$$

震災境況模擬

$$\sigma_L = \sqrt{\sum_j \left\{ (L_j^{\,2} + \sigma_j^{\,2}) \cdot \nu_j \right\}}$$

L = 年平均損失

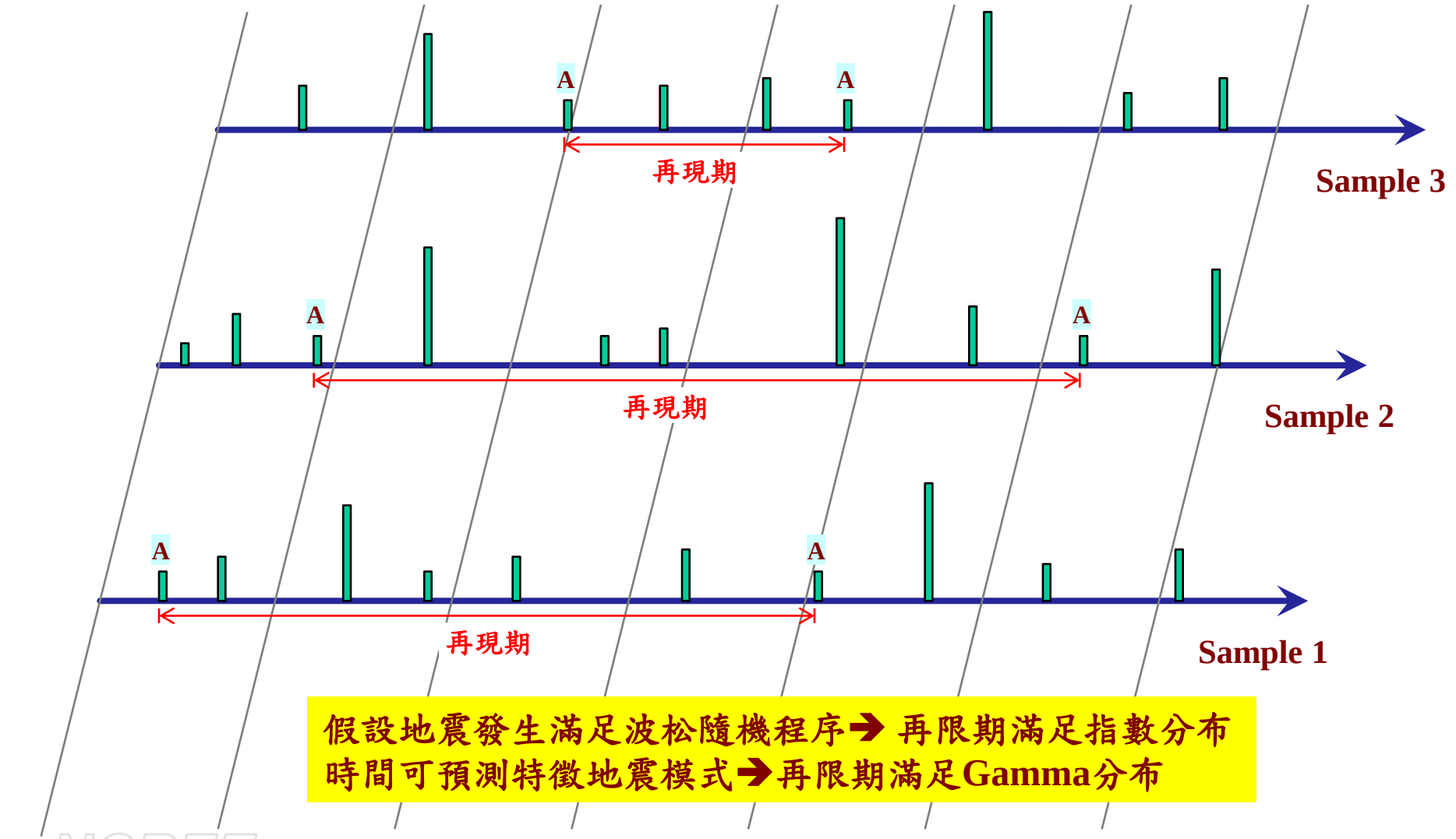
σ_L = 年平均損失的標準差

L_j = 模擬地震 j 引致的損失

ν_j = 模擬地震 j 的年發生率

NCREE Commitment Passion Innovation

蒙地卡羅數值模擬



假設地震發生滿足波松隨機程序➔ 再限期滿足指數分布
時間可預測特徵地震模式➔再限期滿足Gamma分布

NCREE
Commitment Passion Innovation

計算損失之年超越機率

- 假設每一樣本模擬N年，地震發生滿足波松隨機程序
- 樣本內每一年的損失依遞減排序

$$L_1 \geq L_2 \geq \ldots \geq L_K \geq \ldots \geq L_N$$

$1/N$ $1/N$ $1/N$ $1/N$

$L \geq L_1$ is $\nu_1 (= 1/N)$ $\quad P(L \geq L_1) = 1 - e^{-\nu_1}$

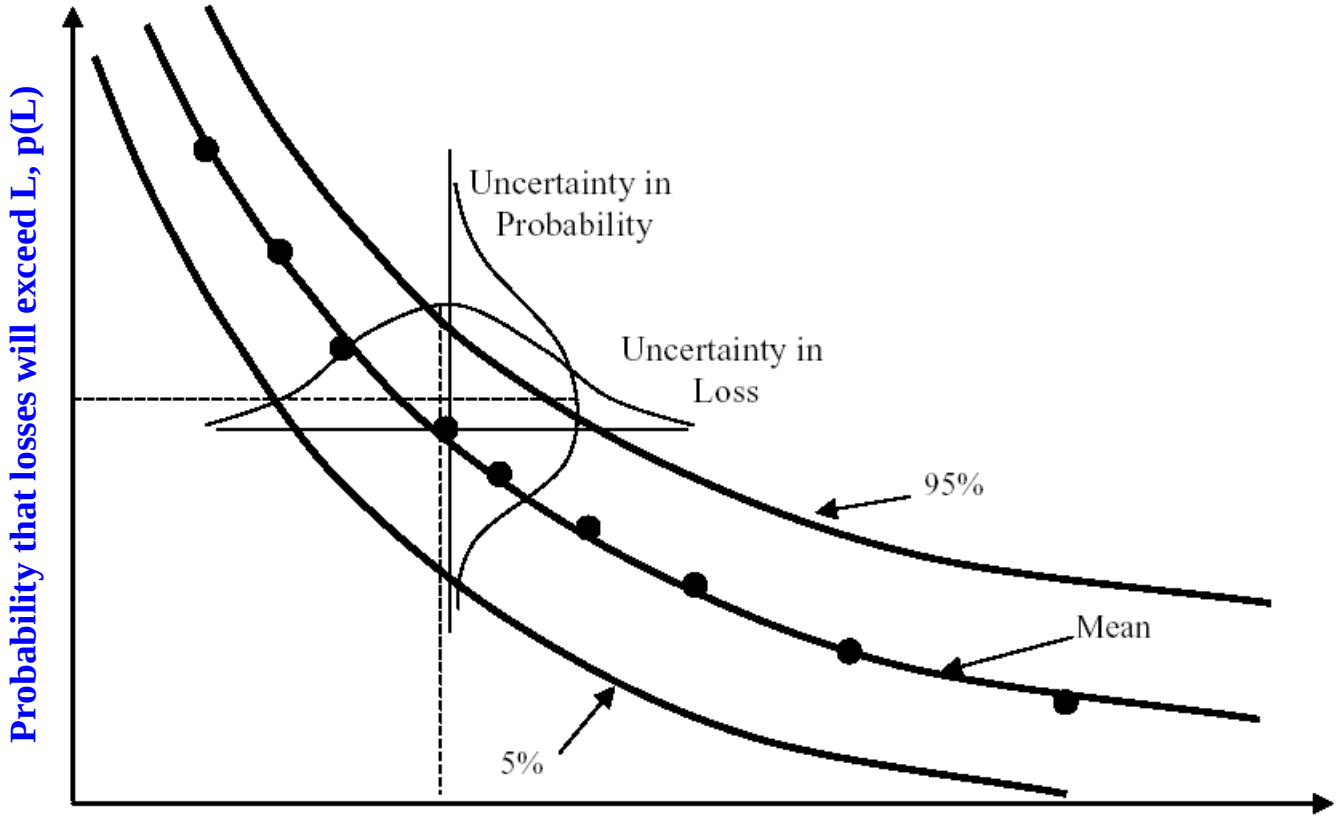
$L \geq L_2$ is $\nu_2 (= 2/N)$ $\quad P(L \geq L_2) = 1 - e^{-\nu_2}$

…… ……

$L \geq L_K$ is $\nu_K (= K/N)$ $\quad P(L \geq L_K) = 1 - e^{-\nu_K}$

NCREE Commitment Passion Innovation

損失的年超越機率曲線與信賴區間



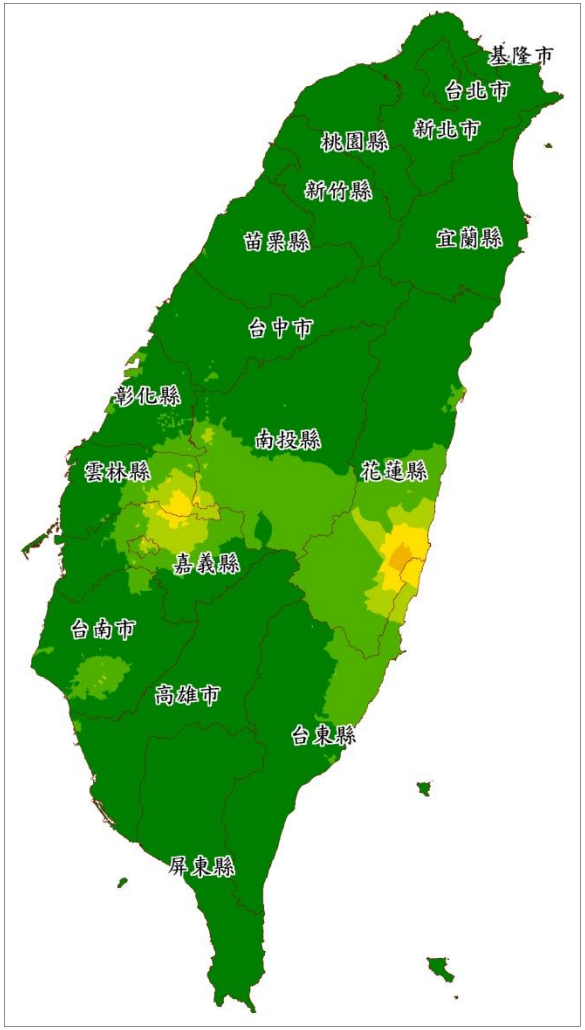
NCREE
Commitment Passion Innovation

土壤液化潛勢分析案例

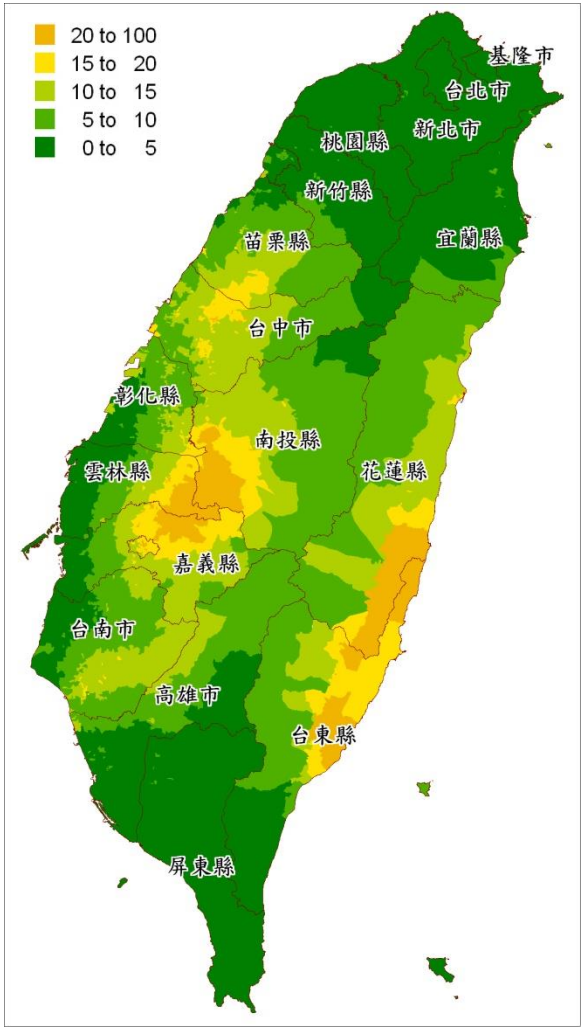
採TELES之液化敏感類別與 P_L值推估式

NCREE Commitment Passion Innovation

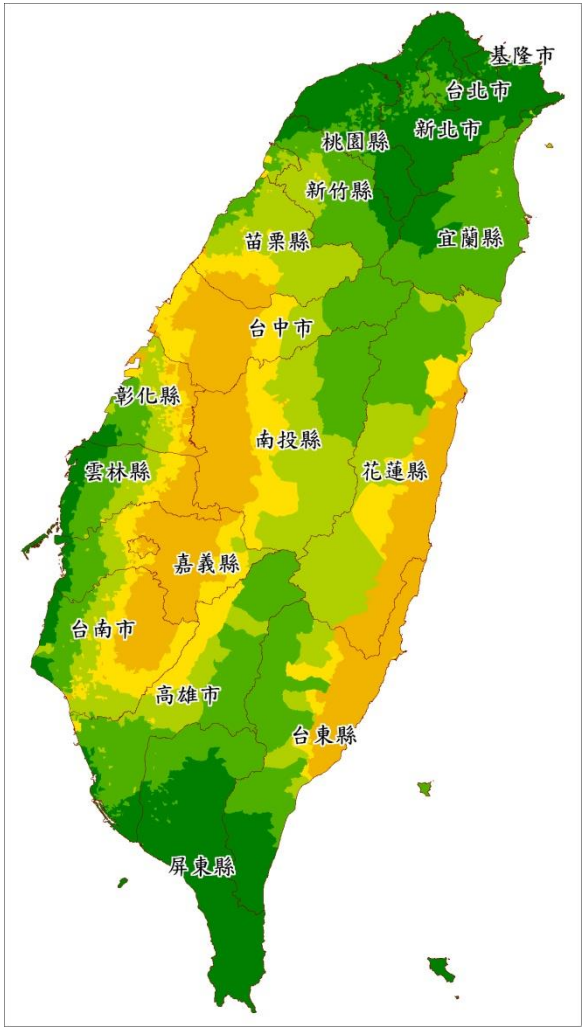
以P_L表示，極低液化敏感類別的潛勢分佈



Liquefied in 50 years



Liquefied in 100 years



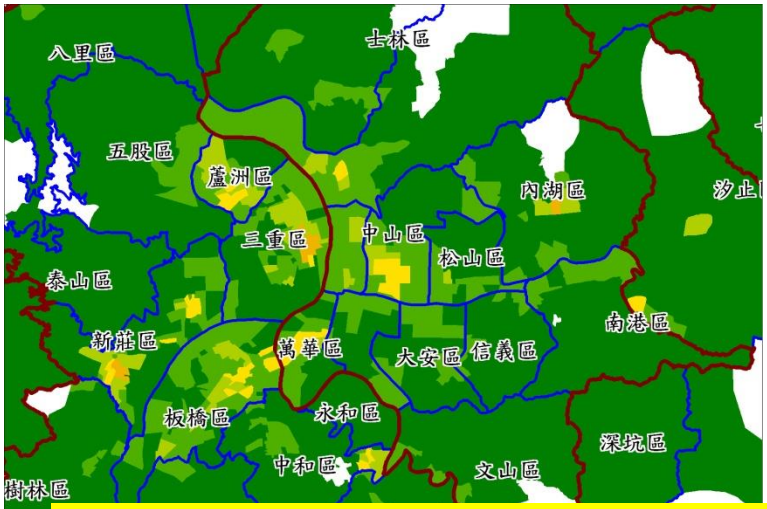
Liquefied in 200 years

村里、LSC，回歸期475年之P_L值

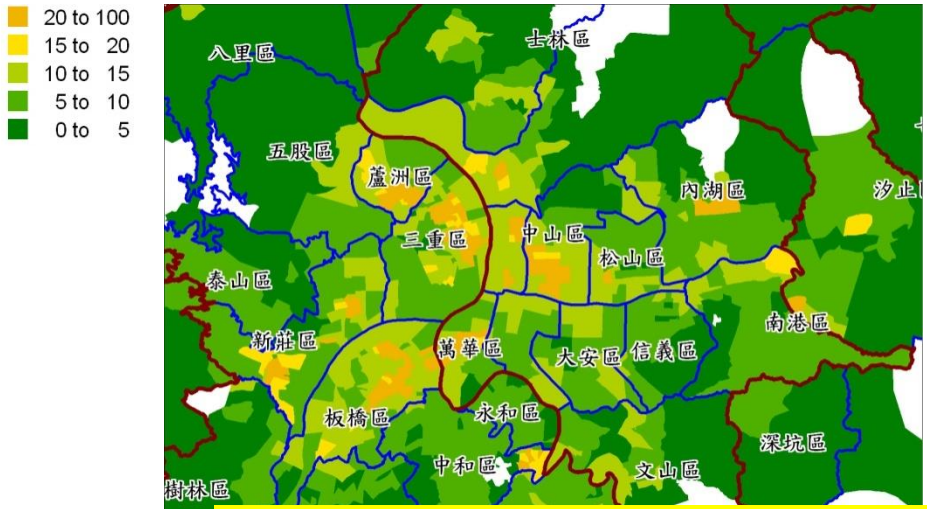
TRACT	WHOLE_NAME	PI_LSC_1	PI_LSC_2	PI_LSC_3	PI_LSC_4	PI_LSC_5
0201001	宜蘭縣宜蘭市神農里	18.94	30.56	49.01	64.74	69.36
0201002	宜蘭縣宜蘭市民權里	21.37	34.30	54.71	71.56	74.48
0201003	宜蘭縣宜蘭市民生里	18.73	30.25	48.53	64.17	69.58
0201004	宜蘭縣宜蘭市昇平里	20.97	33.70	53.80	70.47	75.41
0201005	宜蘭縣宜蘭市大東里	18.63	30.09	48.29	63.89	68.69
0201006	宜蘭縣宜蘭市新興里	20.91	33.60	53.64	70.28	74.26
0201007	宜蘭縣宜蘭市和睦里	21.17	33.99	54.25	71.01	73.76
0201008	宜蘭縣宜蘭市進士里	14.29	23.41	38.09	51.67	56.02
0201009	宜蘭縣宜蘭市南橋里	14.56	23.83	38.72	52.44	55.35
0201010	宜蘭縣宜蘭市建業里	14.50	23.72	38.56	52.25	58.80
0201011	宜蘭縣宜蘭市南津里	13.39	22.03	35.97	49.14	57.24
0201012	宜蘭縣宜蘭市凱旋里	13.42	22.07	36.03	49.21	54.13
0201013	宜蘭縣宜蘭市黎明里	13.38	22.01	35.94	49.11	54.72
0201014	宜蘭縣宜蘭市東村里	14.21	23.28	37.88	51.43	56.20
0201015	宜蘭縣宜蘭市延平里	13.68	22.49	36.67	49.98	55.81
0201016	宜蘭縣宜蘭市七張里	15.72	25.61	41.44	55.68	62.39
0201017	宜蘭縣宜蘭市慈安里	20.33	32.63	52.16	68.51	74.74
0201018	宜蘭縣宜蘭市新民里	18.56	29.98	48.12	63.67	69.01
0201019	宜蘭縣宜蘭市東門里	18.72	30.23	48.50	64.13	69.30
0201020	宜蘭縣宜蘭市中正里	21.10	33.89	54.09	70.83	75.60

NCREE Commitment Passion Innovation

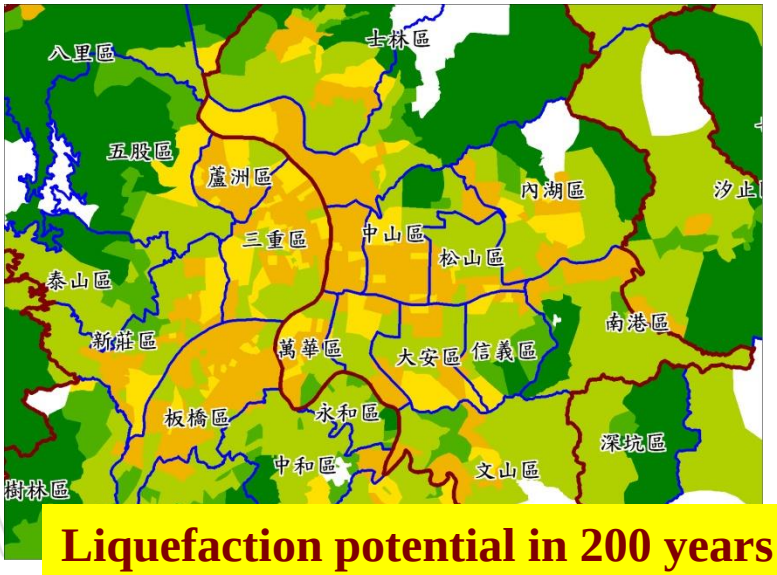
以P_L表示，台北都會區之液化潛勢分佈



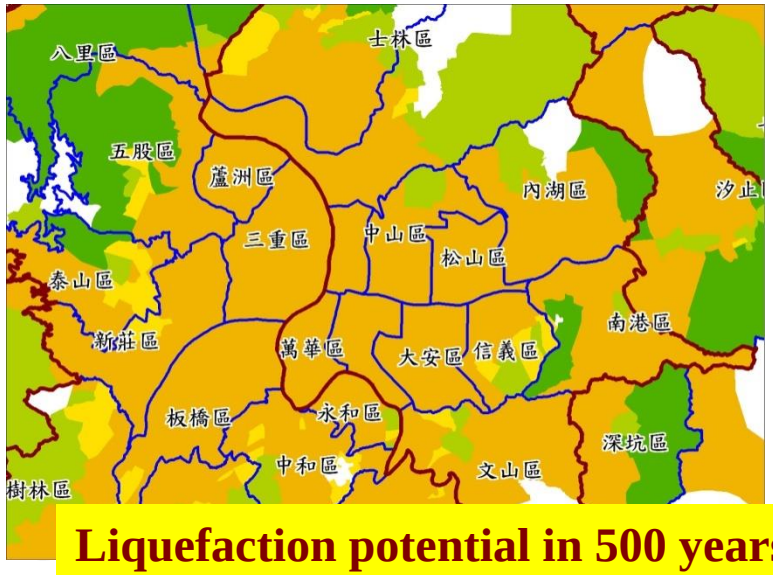
Liquefaction potential in 50 years



Liquefaction potential in 100 years



Liquefaction potential in 200 years



Liquefaction potential in 500 years

結語

NCREE
Commitment Passion Innovation

危害度分析與風險評估之異同與比較

- 風險(R)=災害潛勢(H)×易損性(V)×暴露值(E)
  - 研究區域附近的震源活動特性
  - 工程結構物與社會經濟的易損性(脆弱度)
  - 結構物與人口之數量分佈
- PGA的年超越機率≠損失的年超越機率
  - 依PSHA所得的可能最大地震，無法推估其對應損失的回歸期
  - 有別於損失和傷亡數量，個別工址的災害潛勢分析結果(如PGA或P_L值)通常無法累加
  - 各縣市幅員廣闊，個別工址之危害度曲線差距頗大，不易選取代表性的地區

NCREE Commitment Passion Innovation