

地震災害潛勢資料之整理與應用

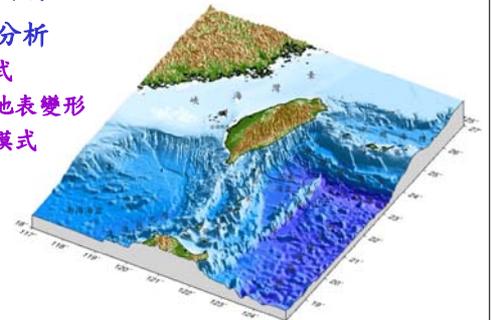
葉錦勳 博士
震災模擬組組長



綱要

- 前言
- 震源分佈與活動特性
- 地震災害潛勢分析
 - 強地動推估模式
 - 斷層錯動引致地表變形
 - 土壤液化評估模式
- 小結

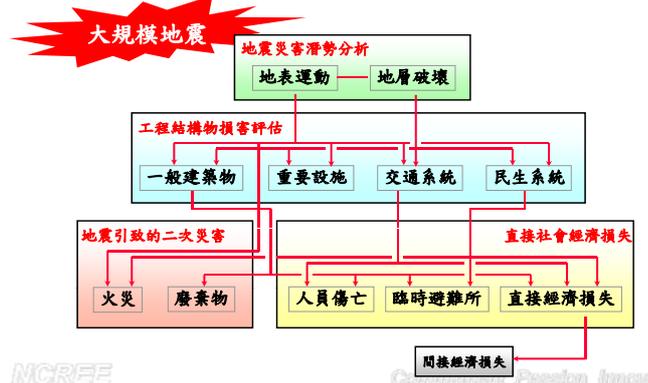
臺灣周圍海域數值地形立體投影圖



震災境況模擬技術

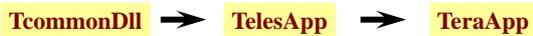
- 給定一組震源參數：地震規模、震央位置、震源深度、斷層破裂長度、寬度、走向、傾角等 (傷亡評估結果與日期、時間有關)
- 運用合理的災害潛勢(震動、液化、山崩等)分析和震損(建物、橋梁、設施等)評估模式和參數值，推估地震可能引致的後果
- 為方便檢視和查詢輸入與輸出資料及其分佈狀況，通常需結合地理資訊系統技術，將自然與人文環境資料展示於地圖上，並須具備製作主題圖和統計分析功能
- 資料庫建置、分析模式與參數校正、整合應用軟體研發

台灣地震損失評估系統(TELES)分析流程與架構



TELES子系統架構、分工和應用

共用之動態連結程式庫



震災境況模擬子系統

- Tpesh
- Thighway
- Twater
- Tgbs
- Trailway
- Tsunami
- Tschool
- Tgas
- Tpower

- 公民營單位之防災與應變計畫
- 防災教育

TREIF-ERA

Tsha

- 震源特性識別
- 機率式地震風險評估
- 地區災害防救計畫—縣市可能最大地震
- 公有設施耐震補強—效益和排序
- 地震保險—風險分散與轉移策略

地震早期損失評估子系統

Tesle

- 建置地震防災與應變資訊網
- 手機App雲端服務

震災境況模擬與風險評估所需資料

- 震源分佈與活動特性
 - 歷史地震目錄、古地震調查結果
 - 活動斷層特性、特徵地震規模、平均再現期
- 地震災害潛勢分析資料與參數
 - 強地動預估模式(震動衰减律、場址效應)
 - 工程鑽孔資料和強震測站鑽探資料
 - 土壤類別圖、液化敏感類別圖、山崩潛勢圖
- 風險暴露資料、震損評估與社會經濟衝擊
 - 行政區界(縣市、鄉鎮區、村里)
 - 一般建築物：房屋稅籍資料、戶籍資料、人口動態分佈
 - 國中、小學和高中職校舍資料
 - 電子地圖、公路與鐵路橋梁空間分佈與耐震屬性資料
 - 自來水系統：自來水管網與設施
 - 瓦斯系統：瓦斯管線與設施

震災境況模擬的應用時機

地震前

- 依據可能地震事件，研擬災害防救計畫，如縣市層級之地區災害防救計畫、鄉鎮層級之都市防災空間規劃、公用事業之防災業務計畫等
- 結合震源機率模型，研發機率式地震風險評估模式，協助研擬地震風險管理對策，如住宅地震保險、橋梁耐震補強排序等
- 作為地震防災演練之情境設定的參考，如國家防災日之地震演練

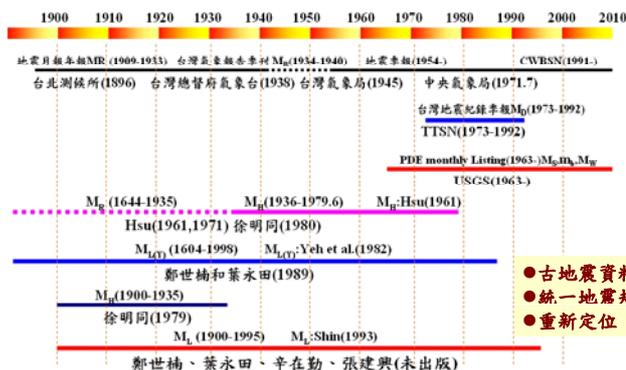
地震後

- 結合地震速報系統，開發地震早期損失評估技術，協助災情研判
- 快速畫定可能的重災區，推估災害規模和分布，協助救災、消防、醫療、民生物資等資源調派

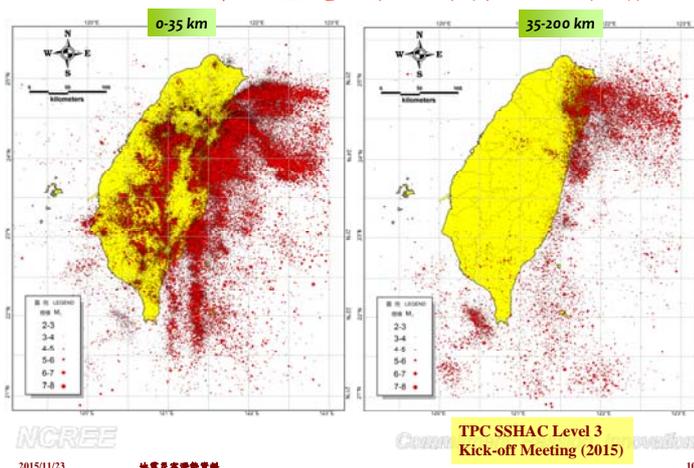
震源分佈與活動特性

台灣地區歷史地震目錄

(涵蓋時間與採用的地震規模比較)



1973~2009年之歷史地震目錄(震央分佈圖)



震源分類與震源機率模型概述

區域震源

- 活動斷層之位置與方向不確定
- 以歷史地震目錄和地震地質構造等進行震源分區
- 常假設地震規模與年發生率滿足G-R關係式，並以穩態波松隨機程序模擬
- 以累積能量曲線推估地震規模的上限

活動斷層震源

- 已知活動斷層位置、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，並推估其特徵地震規模、平均再現期等
- 如依時間可預測之特徵地震模式，尚需上次發生錯移時間

隱沒帶震源

- 區分板塊邊界與板塊內部等兩類地震

中央地質調查所之活動斷層的分類

第一類活動斷層 (全新世活動斷層)

- 全新世 (距今10,000年內) 以來曾經發生錯移之斷層
- 錯移 (或潛移) 現代結構物之斷層
- 與地震相伴發生之斷層 (地震斷層)
- 錯移現代沖積層之斷層
- 地形監測證實具潛移活動性之斷層

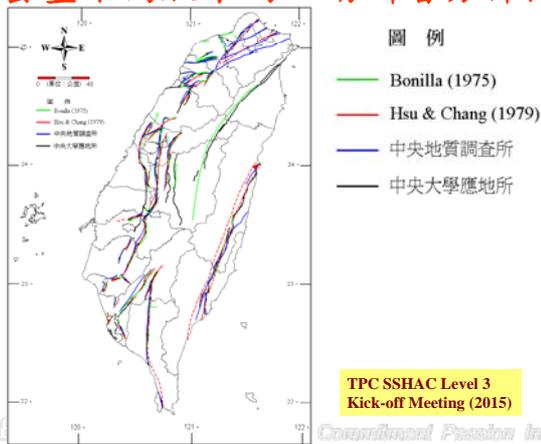
第二類活動斷層 (更新世晚期活動斷層)

- 更新世晚期 (距今約100,000年內) 以來曾經發生錯移之斷層
- 錯移階地堆積物或台地堆積層之斷層

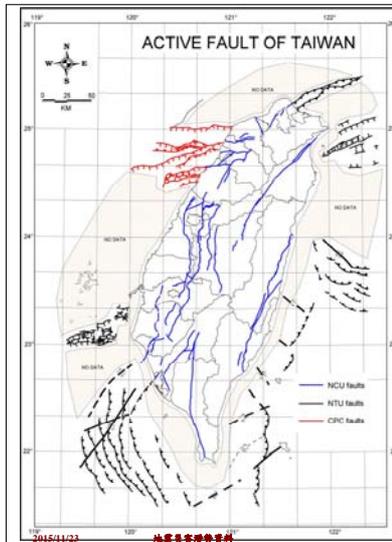
存疑性活動斷層 (為有可能為活動斷層的斷層，包括對斷層的存在性、活動時代、及再活動性存疑者)

- 將第四紀岩層錯移之斷層
- 將紅土緩起伏面錯移之斷層
- 地形呈現活動斷層特徵，但缺乏地質資料佐證者

套疊不同版本的活動斷層分佈圖



陸地與鄰近海域 (活動)斷層



- 藍色斷層: 李錫堤 (1998) 提供
 - 黑色斷層: 劉家瑄 (1998) 提供
 - 紅色斷層: 黃旭燦 (1998) 提供
- 全圖見於宋國城等人 (1998)
台灣活動斷層研究規劃報告

TPC SSHAC Level 3
Kick-off Meeting (2015)

地震災害潛勢資料 —強地動推估模式

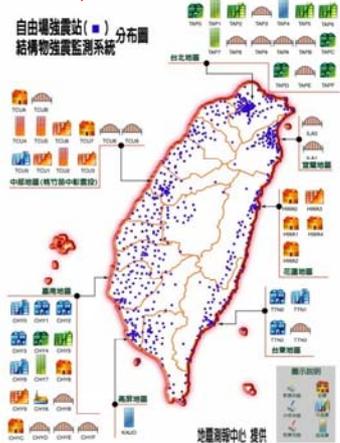
- 強地動
 - 震動衰減律
 - 場址效應修正
- 地表變形
 - 斷層錯移
 - 土壤液化
 - 山崩
- 海嘯

- 破裂斷層兩側地層滑移，造成基礎不均勻沉陷或隆起，結構物因位移而破壞，乃造成橋梁嚴重損害的主因
- 強烈震動時，因慣性力造成橋柱彎矩或剪力破壞，甚至可能發生落橋現象
- 飽和鬆軟土層，因反覆震動造成土壤液化現象，結構物因基礎承载力不足而傾倒
- 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

地震災害潛勢(現象與分類)

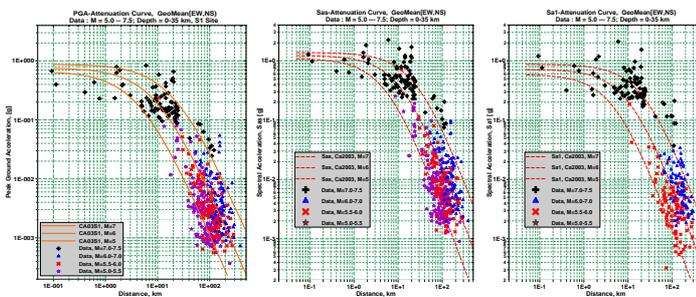
強地動觀測計畫

- 中央氣象局自1991年起推動「強地動觀測計畫」，已收錄30,000筆以上地震規模大於5.5的強震紀錄
- 震動衰減律和場址效應屬地區特性，推估模式中的參數應隨地區而不同
- 推估震動強度時，採用的震動衰減律和場址效應修正模式須互相配合，方能提升評估結果的精度
- HAZUS、NGA以不同震動衰減律，搭配相同場址效應修正係數並非最佳方式

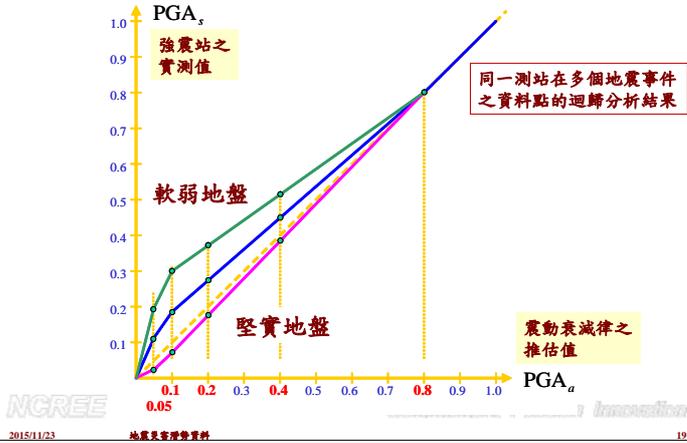


震動衰減律

- 分別描述PGA、Sa03和Sa10的衰減特性
- 依已知震源參數，預估堅實地盤的震動強度
- 一般為地震規模與距離的函數

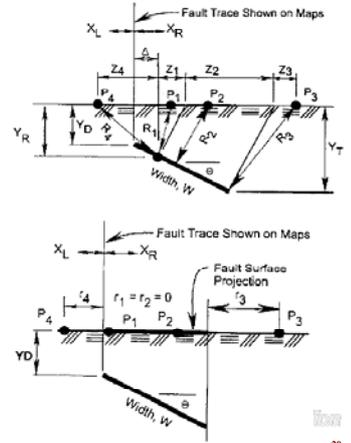


場址效應修正模式示意圖



地表震動強度推估模式

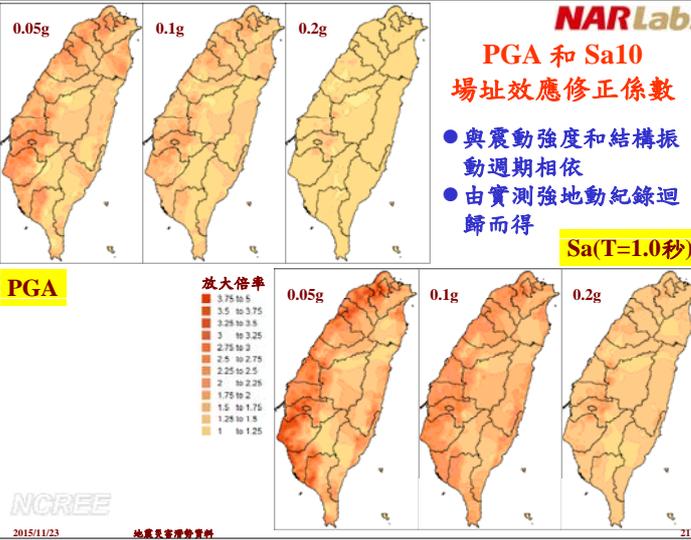
- 震動衰減律
 - 推估PGA、Sa03、Sa10，建構結構彈性反應譜
 - 兼採芮氏規模(震動強度)與震矩規模(斷層幾何特性和延時)的優點
 - 依斷層面最短距離，兼考量孕震帶頂部之深度，適當反映斷層兩側上盤與下盤的差異
- 場址效應修正
 - 利用台灣地區實測地震紀錄進行迴歸分析
 - 依PGA、Sa03、Sa10，各區域(村里)或特定工址(所在網格)均有獨特的場址效應修正曲線



PGA 和 Sa10 場址效應修正係數

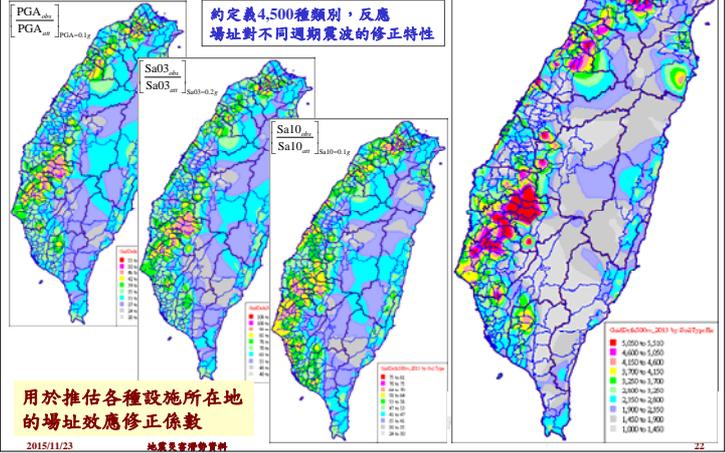
- 與震動強度和結構振動週期相依
- 由實測強地動紀錄迴歸而得

Sa(T=1.0秒)

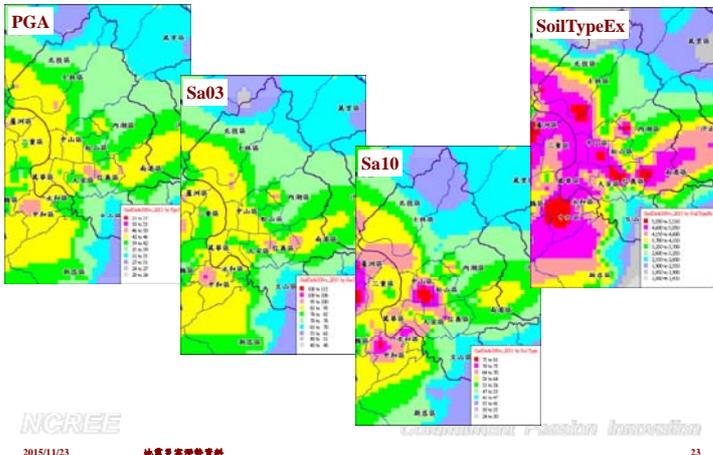


廣義土壤類別圖製作

約定義4,500種類別，反應場址對不同週期震波的修正特性



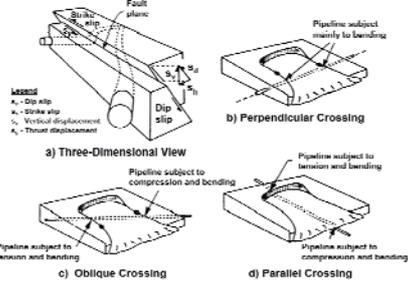
廣義土壤類別圖(以台北市為例)



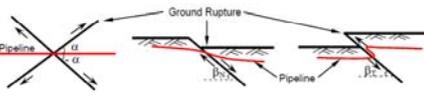
地震災害潛勢 — 地表變形推估模式

土壤液化與斷層錯動引致管線損害示意圖

土壤液化



斷層錯動



(T. D. O'Rourke, Cornell University)

引致地表永久位移之推估模式

土壤液化

- 土壤特性：液化敏感類別、液化時的面積比
- 事件參數：地震規模、PGA、地下水位深度
- 評估數據：液化機率、震陷量

斷層破裂

- 斷層型態：正斷層、逆斷層、平移斷層
- 事件參數：地震規模、斷層面最短距離、破裂面的上盤或下盤
- 評估數據：工址可能的錯動量

地表永久位移之詮釋與應用

永久位移

- 特定距離內的變形量 → 地表應變 → 結構損害

發生機率(遭遇機率)

- 土壤的不確定性、地表破裂的不連續與隨機性

微調位移易損性曲線參數或損害狀態機率?

- 起因為土壤液化或斷層破裂，效果有別
- 位移易損性曲線參數反映上部結構之抗變形能力
- 當考量深基礎之抗液化能力時(可減少上部結構的變形量)，應微調震陷量而非易損性曲線參數
- 當考量遭遇機率時，應改變損害狀態機率

更新斷層破裂引致地表PGD的推估式

$$PGD = \begin{cases} D & \text{距破裂面10公尺內} \\ (1/d_{sr}) \cdot f_H \cdot D \cdot \exp[-d / (d_{sr} \cdot f_H)] & \text{上盤10公尺外} \\ (1/d_{sr}) \cdot f_F \cdot D \cdot \exp[-d / (d_{sr} \cdot f_F)] & \text{下盤10公尺外} \end{cases}$$

d : 場址至斷層破裂面的最短距離(km)

α : 斷層面傾角(度)

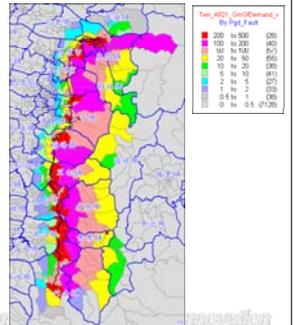
$d_{sr} = \max(M_L / 2, 1)$ 孕震帶頂部深度(km)

$f_F = \text{abs}(\alpha) / 180$

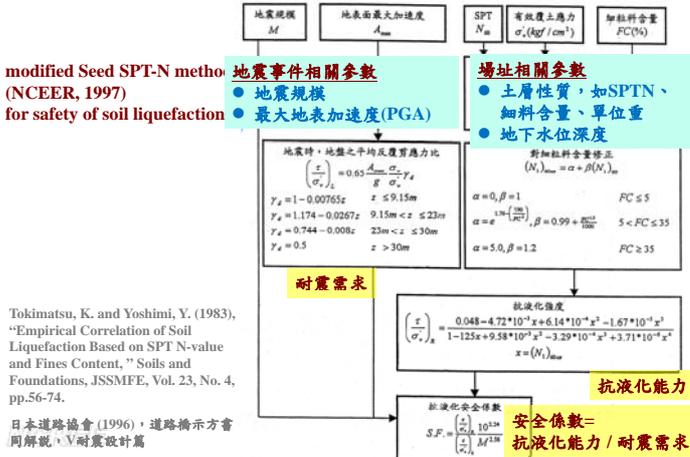
$f_H = 1 - f_F$

$$\log D = \begin{cases} 1.03M_w - 7.03 & \text{平移斷層} \\ 0.29M_w - 1.84 & \text{逆斷層} \\ 0.89M_w - 5.90 & \text{正斷層} \\ 0.82M_w - 5.46 & \text{一般斷層} \end{cases}$$

(單位: m; Wells and Coppersmith, 1994)



抗液化安全係數評估法



液化潛能指數(Iwasaki, 1982)

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

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

$$\text{Safety Factor} = \frac{R(z)}{L(z)}$$

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

可用於推估工址的土壤液化機率和嚴重程度

- $P_L \geq 15$: 液化機率高且可能嚴重液化
- $P_L \leq 5$: 液化機率低或沒有液化現象

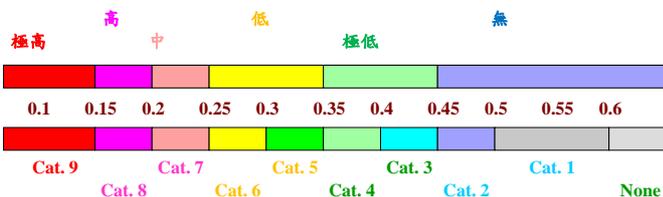
土壤液化敏感類別的分類構想

- 在特定地震事件中(震源特性/地震規模相同)，位於液化較敏感區域的土壤應在較小的PGA下即有液化現象；反之，即使PGA增大也不易產生液化現象
- 在特定地震規模和地下水位條件下，計算不同PGA所對應下的 P_L
 - $M = 7.5$
 - $d_w = 1.5$ meters
- 假設 $P_L=15$ 可視為發生液化現象的門檻值，並將對應 $P_L=15$ 的PGA命名為threshold PGA

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.

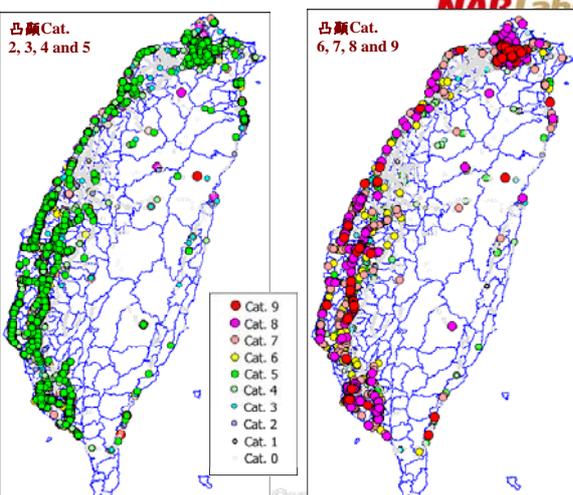
新、舊土壤液化敏感類別定義比較圖

舊的土壤液化敏感類別定義



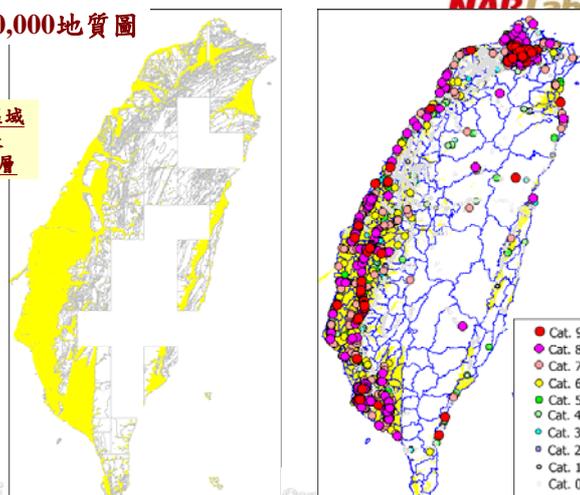
新的土壤液化敏感類別定義

識別工程鑽孔的液化敏感類別

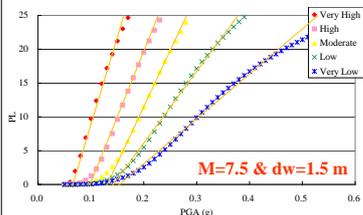


套疊1/50,000地質圖

黃色區域代表沖積層



舊的液化潛能指數(P_L)推估式



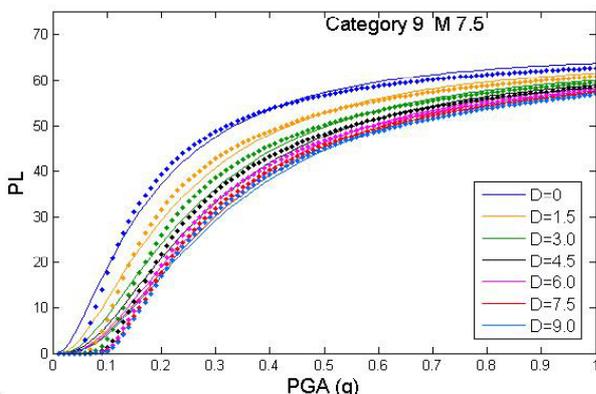
Category	α_i	β_i
Very High	227.52	-13.63
High	188.30	-18.45
Moderate	157.35	-20.51
Low	103.02	-14.95
Very Low	66.95	-10.64

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

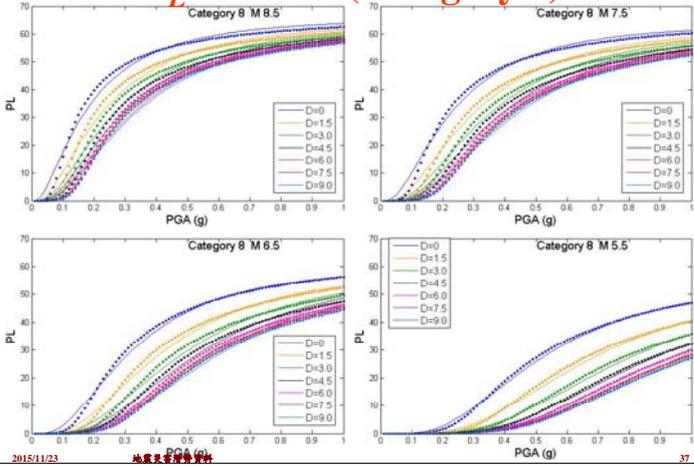
$$f(M) = 0.03528M^2 - 0.18549M + 0.40688$$

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

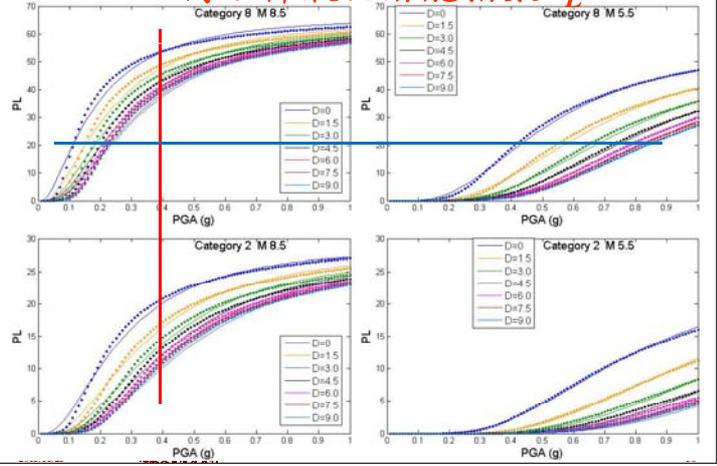
P_L 與 PGA 關係曲線範例



P_L vs. PGA (Category 8)



如何詮釋液化潛能指數 P_L



P_L 與 PGA 關係之非線性迴歸分析

假設 P_L 與 PGA 的關係曲線可以對數常態分布函數描述

$$P_{L,i} = u_{i,PL} \cdot \Phi \left[\frac{\ln(A / m_{i,PL})}{\beta_{i,PL}} \right]$$

分別為液化敏感類別、地震規模和地下水深度函數

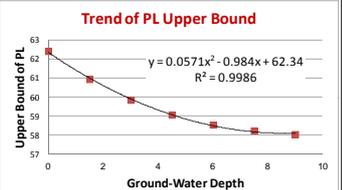
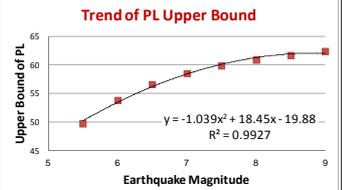
對數PGA的標準差

P_L 上限值的經驗推估式

$$u_{i,PL} = K_{u,i} \cdot (-0.01729M^2 + 0.3072M - 0.331) \cdot (0.000916D^2 - 0.01578D + 1)$$

Anchored at $M = 7.5$
 $d_w = 0$ meter

Susceptibility Category	$K_{u,i}$
Category 9	65.86
Category 8	63.69
Category 7	54.97
Category 6	48.98
Category 5	43.72
Category 4	36.71
Category 3	31.22
Category 2	27.60
Category 1	25.83



P_L 中值之PGA與變異係數的推估式

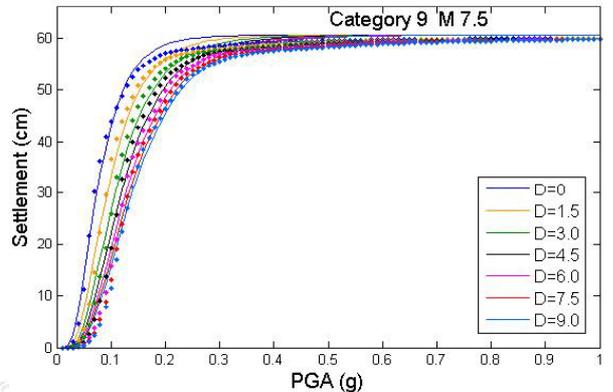
$$m_{i,PL} = K_{m,i} \cdot (-0.03907M^3 + 0.9699M^2 - 8.236M + 24.7) \cdot (0.001021 D^3 - 0.02482D^2 + 0.234D + 1)$$

$$\beta_{i,PL} = K_{\beta,i} \cdot (-0.00739M^3 + 0.1404M^2 - 0.726M + 1.665) \cdot (-0.0000871 D^3 + 0.004257D^2 - 0.05307D + 1)$$

Anchored at $M = 7.5$
 $d_w = 0$ meter

Susceptibility Category	$K_{m,i}$	$K_{\beta,i}$
Category 9	0.1712	0.9540
Category 8	0.2280	0.8275
Category 7	0.2630	0.7646
Category 6	0.2949	0.7234
Category 5	0.3213	0.6963
Category 4	0.3354	0.6840
Category 3	0.3354	0.7013
Category 2	0.3394	0.7095
Category 1	0.3557	0.6871

震陷量與PGA關係曲線範例



震陷量與PGA關係之非線性迴歸分析

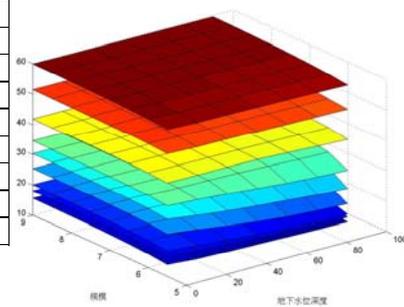
✦ 假設震陷量與PGA的關係曲線可以對數常態分布函數描述

$$S_i = u_{i,S} \cdot \Phi \left[\frac{\ln(A/m_{i,S})}{\beta_{i,S}} \right]$$

P_L 上限值 → $u_{i,S}$
PGA 中值 → A
對數PGA的標準差 → $\beta_{i,S}$
分別為液化敏感類別、地震規模和地下水位深度的函數 → $m_{i,S}$

震陷量上限值與變異係數的經驗推估式

Susceptibility Category	$S_{u,i}$	$S_{\beta,i}$
Category 9	60.64	0.5276
Category 8	52.09	0.5318
Category 7	42.36	0.5572
Category 6	34.99	0.6065
Category 5	30.69	0.6583
Category 4	25.69	0.6687
Category 3	20.30	0.6951
Category 2	18.25	0.6908
Category 1	15.78	0.7169



Regression results of upper-bounds

對應震陷量中值之PGA的經驗推估式

$$m_{i,S} = S_{m,i} \cdot (-0.05693M^3 + 1.4192M^2 - 12.0101M + 35.263) \cdot (0.000483 D^3 - 0.01458D^2 + 0.1897D + 1)$$

Anchored at
 $M = 7.5$
 $d_w = 0$ meter

Susceptibility Category	$S_{m,i}$
Category 9	0.0746
Category 8	0.1052
Category 7	0.1276
Category 6	0.1452
Category 5	0.1643
Category 4	0.1697
Category 3	0.1683
Category 2	0.1651
Category 1	0.1742

小結

- ✦ 在給定地震規模和地下水位深度的條件下，液化潛能指數和震陷量均可以對數常態分佈曲線描述
- ✦ 不同液化敏感類別之液化潛能指數和震陷量隨地震規模和地下水位深度改變的修正函數相似
- ✦ 液化潛能指數採對數常態分佈曲線推估，一方面可提高推估結果的精度，另一方面可詮釋為液化機率
- ✦ 前述液化潛能指數和震陷量的推估誤差小於 10%
- ✦ 未來將結合地質圖、河川流域分佈圖等製作液化敏感類別圖，並進行機率式土壤液化危害度分析