



埤豐橋附近斷層



台中港碼頭液化現象



草嶺山崩

2016/11/22 2016台灣地震損失評估系統講習會，土壤液化評估結果之詮釋與應用

4

NAR Labs
國家實驗研究院

土壤液化評估結果之 詮釋與應用

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

承諾·熱情·創新

www.narlabs.org.tw



集集線鐵路受擠壓變形



台電的中寮開閉所液化現象



鐵路系統 / 公路系統

一江橋因擠壓而落橋



電力系統 / 公共給水系統

石岡水壩壩體抬升9公尺

2016/11/22 2016台灣地震損失評估系統講習會，土壤液化評估結果之詮釋與應用

5

簡報大綱

- ✦ 背景介紹—地震災害潛勢/現象
- ✦ 單一地震/工程鑽孔之土壤液化潛勢評估法
- ✦ 土壤液化潛勢圖 vs. 土壤液化敏感類別圖
- ✦ 土壤液化敏感類別之可操作式定義
- ✦ 土壤液化潛能指數和震陷量之推估式
- ✦ 土壤液化之境況模擬結果的詮釋與應用
- ✦ 結語

NCREE

Commitment Passion Innovation

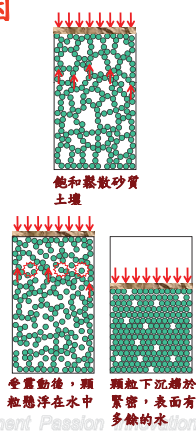
2016/11/22

2016台灣地震損失評估系統講習會，土壤液化評估結果之詮釋與應用

2

土壤液化的成因

- ✦ 當飽和鬆散的砂土受到反覆震動時，顆粒與顆粒之間產生相對位移；由於砂土顆粒趨向緊密排列，使其體積有傾向收縮的趨勢
- ✦ 當砂土顆粒重新排列而體積收縮時，因短時間內無法排除多餘的水份，導致孔隙水壓上升，因而降低土壤顆粒間的有效應力
- ✦ 若震動持續一段時間，致使孔隙水壓接近覆土應力時，土壤的有效應力趨近於零
- ✦ 此時，砂土顆粒懸浮於水中，呈現液態的現象稱為土壤液化



飽和鬆散砂質土壤
受震動後，顆粒懸浮在水中
顆粒下沉趨於緊密，表面有多餘的水

NCREE

Commitment Passion Innovation

2016/11/22

2016台灣地震損失評估系統講習會，土壤液化評估結果之詮釋與應用

6

地震引致的災害潛勢(致災因子)

- ✦ 斷層破裂引致附近地表土層擠壓或拉伸變形，造成基礎不均勻沉陷或隆起，上部結構因基礎變形而破壞
- ✦ 強烈地震動時，結構物因慣性造成應力過大而產生彎矩或剪力破壞
- ✦ 發生土壤液化現象時，結構物因基礎以下土壤的承载力不足而傾倒
- ✦ 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
- ✦ 海域之逆(正)斷層破裂至地表時，突然的海底地形擾動造成海嘯

NCREE

Commitment Passion Innovation

2016/11/22

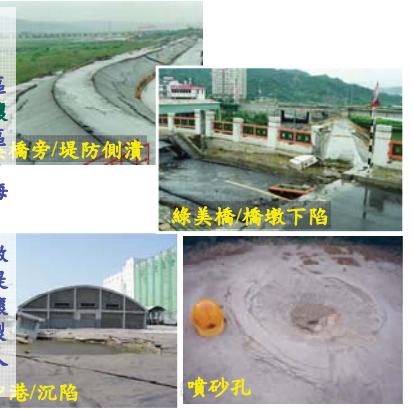
2016台灣地震損失評估系統講習會，土壤液化評估結果之詮釋與應用

3

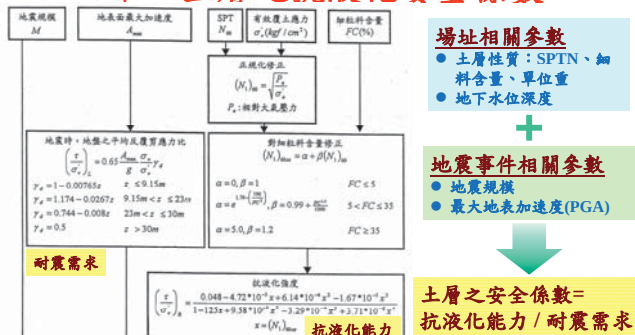
單一地震/工程鑽孔之 土壤液化潛勢評估法

土壤液化現象

- 土壤液化的表徵：
沉陷、噴砂、側潰
- 容易發生土壤液化的區域：高地下水位且土壤以疏鬆細砂為主的地區，如近代河口三角洲、舊河道、抽砂回填的海埔新生地等
- 可能造成建築物與橋墩傾斜下陷；擋土牆、堤防及河岸邊結構物崩壞傾覆；道路與農田開裂或塌陷；地下管線與人孔被抬出地面並斷裂



單一土層之抗液化安全係數



美濃地震土壤液化案例



液化潛能指數(Iwasaki, 1982)

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

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

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

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

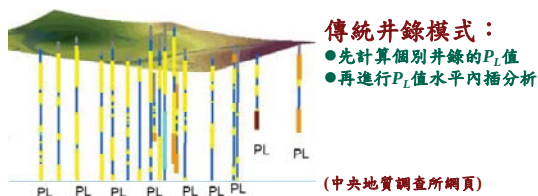
綜合考慮地表下20公尺內之不同土層的安全係數；用於推估工址的土壤液化可能性(機率)和嚴重程度

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

美濃地震後的省思

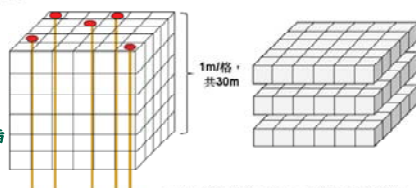
- 受強烈地震動或鄰近斷層破裂帶時，上部結構(柱、梁、牆和版等構件)因慣性力或基礎變形而損害，才是造成人命傷亡的主因
- 耐震能力有疑慮的老舊建築物，應儘速完成耐震評估與補強，確保在強震作用下不會倒塌以確保生命安全
- 土壤液化時，因地震的剪力波無法傳遞至上部結構，具隔震效果；但因土壤喪失承载力，可導致基礎變形或上部結構傾斜、倒塌
- 為避免土壤液化而導致財物損失可投保地震險

土壤液化潛勢圖製作流程



三維網格模式：

- 水平劃分 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$
- 垂直向每公尺一格
- 井錄資料先進行垂直內插
- 每米一層進行水平內插
- 計算網格的 P_L 值



2016/11/22

2016台灣地震損失評估系統研習會，土壤液化評估結果之詮釋與應用

16

土壤液化潛勢之計算

✚ 需有適合土壤液化評估使用之工程鑽孔資料

✚ 設計地震(475年回歸期)

●設計地表加速度值(0.3秒設計譜加速度值/2.5)

▶地震危害度分析的結果 鑽探資料 + 設計地震 + 地下水位 = 土壤液化潛勢

●控制地震規模

▶透過地震危害度分析的參數拆解，得到對應不同回歸期之控制地震規模

●考慮近斷層調整因子、場址放大效應等

✚ 依液化潛能指數概分三級

●低潛勢($P_L < 5$)

●中潛勢($5 \leq P_L < 15$)

●高潛勢($P_L \geq 15$)

NCREE

Commitment

2016/11/22

2016台灣地震損失評估系統研習會，土壤液化評估結果之詮釋與應用

13

三維網格與井錄模式之分析結果比較



2016/11/22

2016台灣地震損失評估系統研習會，土壤液化評估結果之詮釋與應用

17

土壤液化潛勢圖 vs. 土壤液化敏感類別圖

NCREE

Commitment Passion Innovation

2016/11/22

2016台灣地震損失評估系統研習會，土壤液化評估結果之詮釋與應用

14

其它國家土壤液化圖資公開概況

✚ 日本、美國均有公開之土壤液化潛勢圖，圖比例尺約為兩萬五千分之一

✚ 日本：土壤液化潛勢之設計地震依各地可能地震強度而異，大致依土壤液化潛能指數值區分為高潛勢、中潛勢、低潛勢等三級

✚ 美國：主要依據地表覆土層的形成年代、地形、地下水位和土壤特性等，將不同地理單元歸納為極高、高、中、低、極低等五種液化敏感類別，暫不考慮設計地震力

NCREE

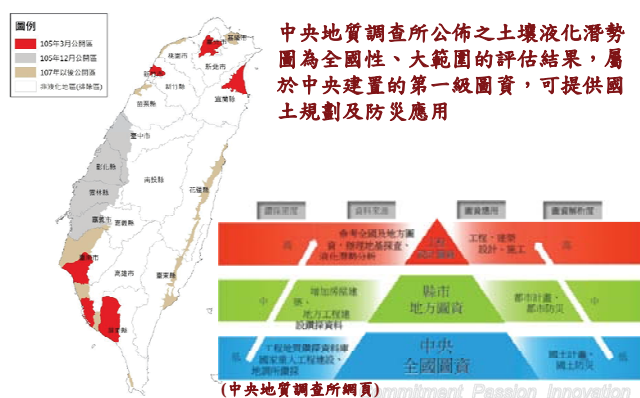
Commitment Passion Innovation

2016/11/22

2016台灣地震損失評估系統研習會，土壤液化評估結果之詮釋與應用

18

地質調查所公佈的土壤液化潛勢圖



2016/11/22

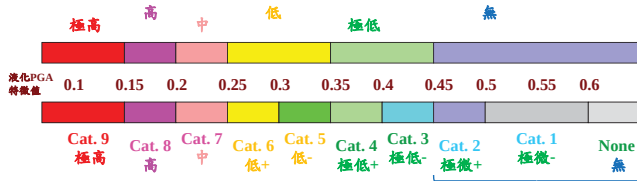
2016台灣地震損失評估系統研習會，土壤液化評估結果之詮釋與應用

15

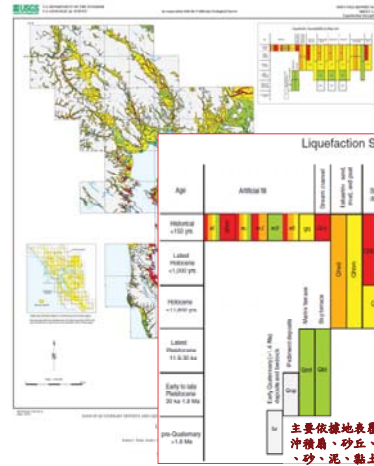
土壤液化敏感類別之可操作式定義

✚ 葉錦勳(2002)提出可操作式定義如下

- 在特定條件($M = 7.5$ 、 $d_w = 1.5$ m)下，計算個別鑽孔在不同PGA作用下所對應的 P_L
- 將對應 $P_L=15$ 的PGA命名為液化PGA特徵值
- 依液化PGA特徵值劃分土壤液化敏感類別



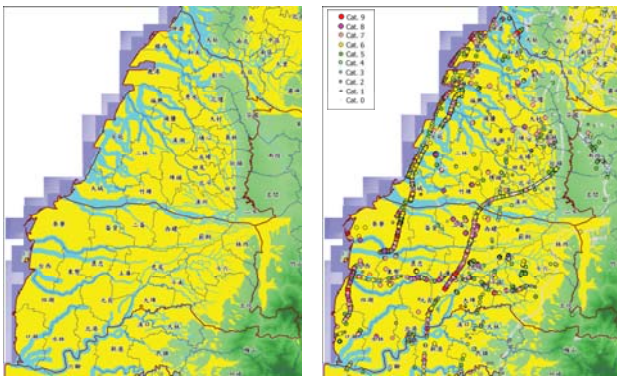
新的土壤液化敏感類別定義(Yeh, et al., 2015)



美國舊金山灣區
土壤液化敏感分區圖

主要依據地表覆土層的形成年代、地形(如河道、河岸、河階、沖積扇、砂丘、入海口、海岸)、地下水位和土壤特性(人工填土、砂、泥、黏土)等

整合地質、數值地形、河川流域 與工程鑽孔資料



土壤液化敏感類別之 可操作式定義

鑽孔位置之實測與背景值的差異統計

依高程劃分土壤液化敏感類別之背景值；在鄰近水域的地區和靠近海邊的區域內，其背景值增加1

● 利用工程鑽孔資料作為檢驗的依據

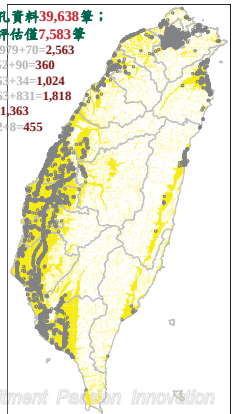
高程 (公尺)	土壤液化 敏感類別	實際值與 背景值差異	背景值=5	背景值=6	背景值=7	背景值=8
		-7				122
		-6			195	102
<5	7	-5		197	159	176
≥5 且 <15	6	-4	228	165	227	241
		-3	154	202	319	311
≥15	5	-2	175	264	450	397
		-1	201	329	651	394
		0	284	422	668	175
		1	247	367	341	44
		2	231	180	55	
		3	111	105		
		4	16			

資料現況、觀察與檢討

- 工程鑽孔資料分佈不均，多數呈線型分佈且集中於重大公共工程建設
- 工程鑽孔資料乃分年收集，並由不同單位進行試驗，資料品質不一
- 考量地下土壤變異性頗大，傳統井錄模式或三維網格模式等內插法均不適用
- HAZUS僅以定性描述，作為判識土壤液化敏感類別之依據，未能妥善運用工程鑽孔資料
- 高液化敏感區在較小PGA即有液化現象；低液化敏感區須較大PGA方有液化可能

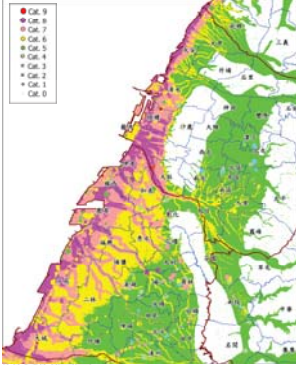
共收集CGS之鑽孔資料**39,638**筆；
可用於土壤液化評估僅**7,583**筆

北/北/臺：	1,514+979+70=	2,563
桃/竹/苗：	118+152+90=	360
中/彰/投：	237+752+34=	1,024
雲/嘉/南：	724+263+831=	1,818
高/屏：	976+387=	1,363
宜/花/東：	365+82+8=	455



液化敏感類別圖(1/3)

台中、彰化

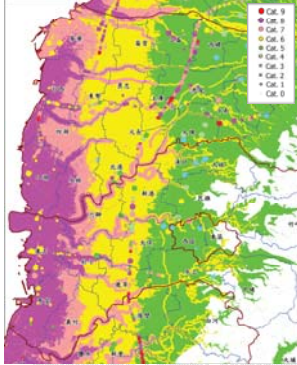


2016/11/22

2016台灣地震損失評估系統講習會，土壤液化評估結果之詮釋與應用

28

雲林、嘉義



以鑽孔實測值輔助液化敏感類別圖製作

- 篩選適用之工程鑽孔資料，譬如須包含SPTN值和細料含量等；本研究篩選Cat ≥ 3 的鑽孔
- 為避免嚴重低估液化敏感類別，需微調鑽孔所在地之液化敏感類別值，使之不小於(背景值-2)，令修正值為 m ， $m \geq 0$
- 計算個別鑽孔與鄰近500 m內之鑽孔的平均距離(d_{avg})；取半徑為 r_{buf} 的環域， $r_{buf} = \max(200, \min(500, d_{avg})) / (2^m)$
- 鑽孔環域之重疊區域以較高液化敏感類別值為主；在實務應用時須注意**不確定性**

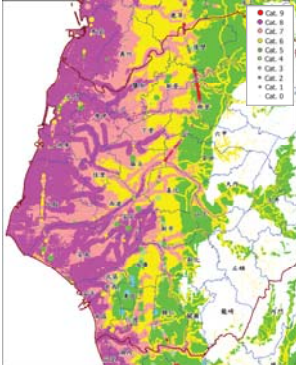
2016/11/22

2016台灣地震損失評估系統講習會，土壤液化評估結果之詮釋與應用

25

液化敏感類別圖(2/3)

台南

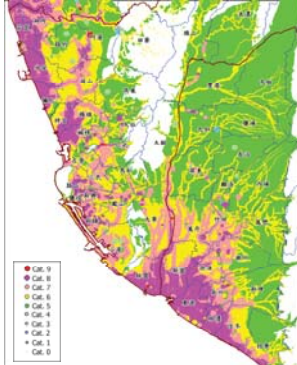


2016/11/22

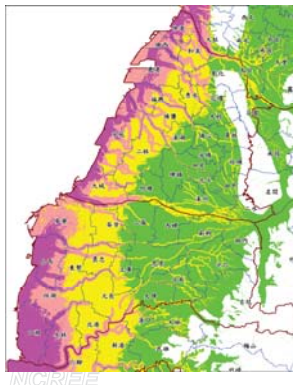
2016台灣地震損失評估系統講習會，土壤液化評估結果之詮釋與應用

29

高雄、屏東



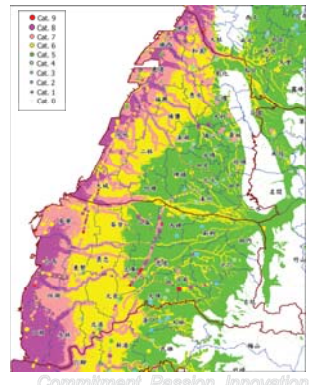
液化敏感類別背景圖與最終結果



2016/11/22

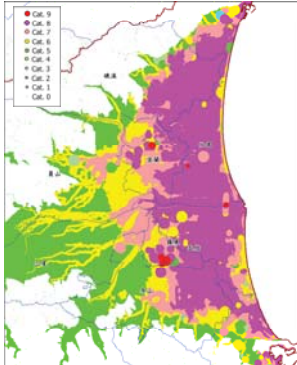
2016台灣地震損失評估系統講習會，土壤液化評估結果之詮釋與應用

26



液化敏感類別圖(3/3)

宜蘭



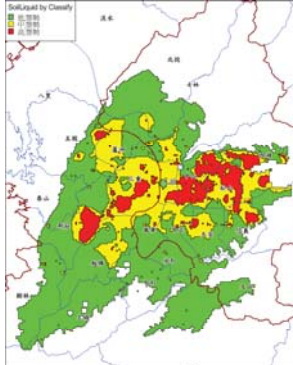
2016/11/22

2016台灣地震損失評估系統講習會，土壤液化評估結果之詮釋與應用

30

CGS液化潛勢圖vs. 液化敏感類別圖

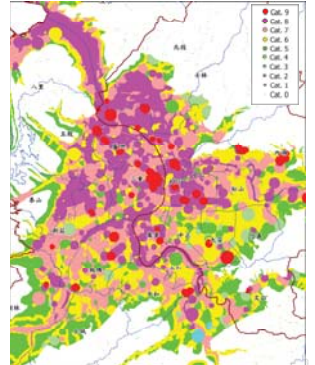
台北盆地



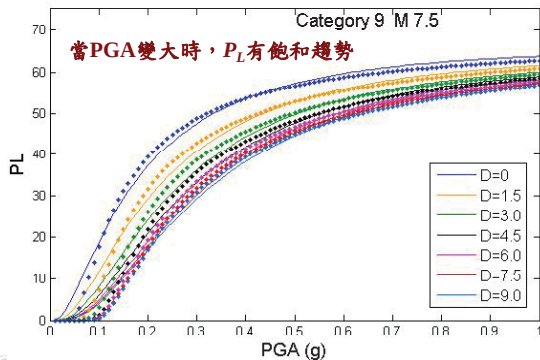
2016/11/22

2016台灣地震損失評估系統講習會，土壤液化評估結果之詮釋與應用

27



P_L 與 PGA 關係曲線範例



NCREE

Commitment Passion Innovation

2016/11/22

2016 台灣地震損失評估系統研習會，土壤液化評估結果之詮釋與應用

34

土壤液化潛能指數和震陷量之推估式

NCREE

Commitment Passion Innovation

2016/11/22

2016 台灣地震損失評估系統研習會，土壤液化評估結果之詮釋與應用

31

P_L 與 PGA 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、地震規模和地下水位深度的函數

對數PGA的標準差

NCREE

Commitment Passion Innovation

2016/11/22

2016 台灣地震損失評估系統研習會，土壤液化評估結果之詮釋與應用

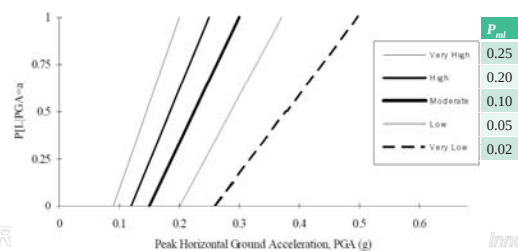
35

HAZUS之土壤液化機率推估式

$$P(L_{SC}) = \frac{P(L_{SC}|PGA=a)}{K_M \cdot K_W} \cdot P_{ml}$$

$$K_M = 0.0027M^3 - 0.0267M^2 - 0.2055M + 2.9188$$

$$K_W = 0.022d_w + 0.93$$



NCREE

Commitment Passion Innovation

2016/11/22

2016 台灣地震損失評估系統研習會，土壤液化評估結果之詮釋與應用

32

不同液化敏感類別之 P_L 推估式

$$u_{i,PL} = K_{u,i} \cdot (-0.0176M^2 + 0.3127M - 0.3561)$$

$$\cdot (0.000925D^2 - 0.01592D + 1)$$

$$m_{i,PL} = K_{m,i} \cdot (-0.03948M^3 + 0.9792M^2 - 8.305M + 24.87)$$

$$\cdot (0.001316D^3 - 0.02931D^2 + 0.2486D + 1)$$

$$\beta_{i,PL} = K_{\beta,i} \cdot (-0.0082M^3 + 0.1599M^2 - 0.8843M + 2.096)$$

$$\cdot (-0.000114D^3 + 0.00467D^2 - 0.0542D + 1)$$

Susceptibility Category	$K_{u,i}$	$K_{m,i}$	$K_{\beta,i}$
Category 9	73.44	0.1648	0.9692
Category 8	67.07	0.2327	0.8151
Category 7	59.85	0.2739	0.7521
Category 6	53.31	0.3054	0.7118
Category 5	45.56	0.3300	0.6893
Category 4	39.39	0.3432	0.6826
Category 3	34.66	0.3558	0.6767
Category 2	31.15	0.3558	0.6911
Category 1	26.69	0.3583	0.6930

不同土壤液化敏感類別之與地震規模及地下水位相關的修正式均相同

NCREE

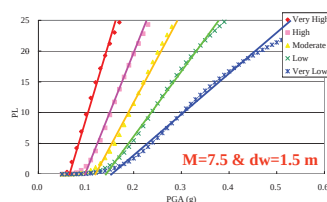
Commitment Passion Innovation

2016/11/22

2016 台灣地震損失評估系統研習會，土壤液化評估結果之詮釋與應用

36

不同液化敏感類別之舊 P_L 推估式



Category	α_i	β_i	P_{ml}
Very High	227.52	-13.63	0.20
High	188.30	-18.45	0.14
Moderate	157.35	-20.51	0.09
Low	103.02	-14.95	0.05
Very Low	66.95	-10.64	0.02

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

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

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

NCREE

Commitment Passion Innovation

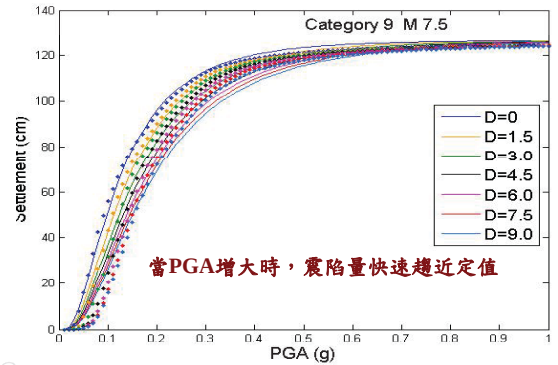
2016/11/22

2016 台灣地震損失評估系統研習會，土壤液化評估結果之詮釋與應用

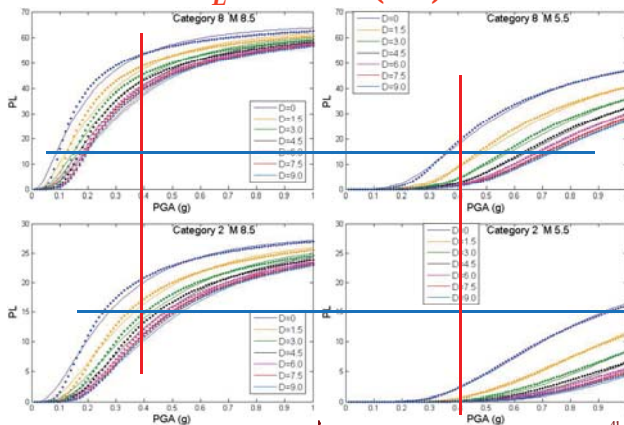
33

土壤液化之境況模擬結果的詮釋與應用

震陷量與PGA關係曲線範例



P_L 值的詮釋(1/2)



震陷量與PGA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

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

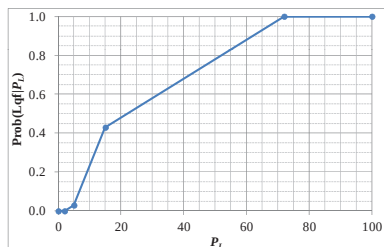
分別為液化敏感類別、地震規模和地下水位深度的函數

P_L 上限值

PGA 中值

對數PGA的標準差

P_L 值的詮釋(2/2)



$$P(\text{Lique.} | P_L) = \begin{cases} 0, & \text{when } P_L \leq 2 \\ 0.01 \cdot (P_L - 2), & \text{when } 2 < P_L \leq 5 \\ 0.03 + 0.04 \cdot (P_L - 5), & \text{when } 5 < P_L \leq 15 \\ 0.43 + 0.01 \cdot (P_L - 15), & \text{when } 15 < P_L \leq 72 \\ 1, & \text{when } 72 < P_L \end{cases}$$

Category	P_{inf}
9	0.30
8	0.25
7	0.20
6	0.15
5	0.10
4	0.06
3	0.03
2	0.02
1	0.01

Liquefaction potential

- at one point (left)
- in a region with finite area (right)

不同液化敏感類別之震陷量推估式

$$u_{i,S} = S_{u,i}$$

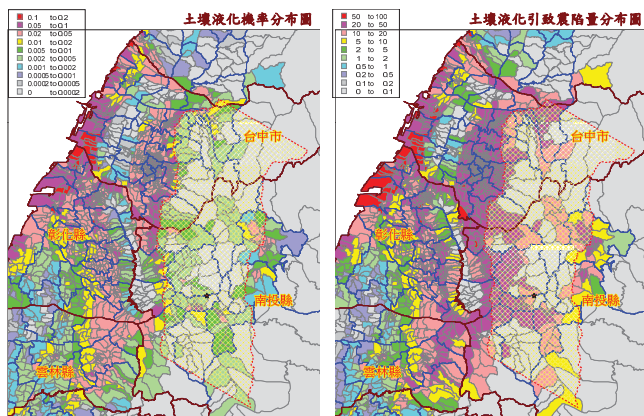
$$m_{i,S} = S_{m,i} \cdot (-0.0566M^3 + 1.4091M^2 - 11.921M + 35.002) \cdot (0.000346 D^3 - 0.00852D^2 + 0.1087D + 1)$$

$$\beta_{i,S} = S_{\beta,i} \cdot (0.00113M^3 - 0.03172M^2 + 0.2863M + 0.1595) \cdot (-0.00037 D^3 + 0.00881D^2 - 0.0602D + 1)$$

Susceptibility Category	$S_{u,i}$	$S_{m,i}$	$S_{\beta,i}$
Category 9	126.55	0.1188	0.8136
Category 8	92.15	0.1568	0.7446
Category 7	79.73	0.1850	0.7028
Category 6	60.79	0.2024	0.7101
Category 5	50.79	0.2196	0.7365
Category 4	41.69	0.2244	0.7504
Category 3	33.71	0.2228	0.7615
Category 2	30.33	0.2193	0.7330
Category 1	28.28	0.2234	0.7304

不同土壤液化敏感類別之與地震規模及地下水位相關的修正式均相同

九二一地震引致土壤液化之模擬結果



2016/11/22 2016台灣地震損失評估系統講習會，土壤液化評估結果之詮釋與應用

46

地表變形推估模式

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：工址可能的地表變形量

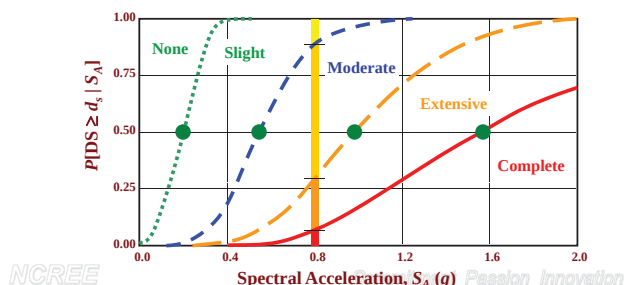
2016/11/22

2016台灣地震損失評估系統講習會，土壤液化評估結果之詮釋與應用

43

易損性曲線的意義

- ✚ 損害狀態概分無、輕微、中度、嚴重和完全損害
- ✚ 易損性曲線：超越不同損害狀態的超越機率曲線，包含中值和變異係數
- ✚ 易損性曲線的自變數可為災害潛勢或結構反應參數
- ✚ 依災害潛勢因子不同，概分為震動易損性和位移易損性兩類



2016/11/22

2016台灣地震損失評估系統講習會，土壤液化評估結果之詮釋與應用

47

斷層破裂引致地表變形(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)

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

$f_H = 1 - f_F$

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

以工址距斷層破裂面的距離 d_e 推估工址發生地表變形的機率；其遭遇(發生)機率以下式推估

$$p = 0.7 \cdot \exp(-d_e / 2)$$

(單位: m; Wells and Coppersmith, 1994)

2016/11/22

2016台灣地震損失評估系統講習會，土壤液化評估結果之詮釋與應用

44

地表變形推估結果之詮釋與應用

地表變形量

- 固定距離內的變形量

發生機率(遭遇機率)

- 考量土壤和破裂的不確定性，地表變形並非連續

微調位移易損性曲線參數或損害狀態機率？

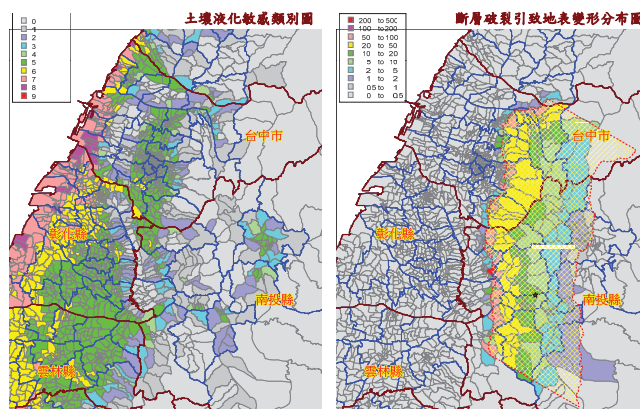
- 起因為土壤液化或斷層破裂，效果有別
- 位移易損性曲線參數反映上部結構之抗變形能力
- 當考量深基礎之抗液化能力時(可減少上部結構的變形量)，應微調震陷量而非易損性曲線參數
- 當考量遭遇機率時，應改變損害狀態機率

2016/11/22

2016台灣地震損失評估系統講習會，土壤液化評估結果之詮釋與應用

48

九二一地震引致地表變形之模擬結果



2016/11/22

2016台灣地震損失評估系統講習會，土壤液化評估結果之詮釋與應用

45

結語

- ✚ 土壤液化是常見的地震災害潛勢，常引致財物損失但非傷亡；欲分散風險可投保地震險
- ✚ 製作土壤液化潛勢圖之鑽孔資料分布不均、品質不一，採傳統井錄或三維網格模式須謹慎
- ✚ 在沒有詳細鑽孔資料時，土壤液化敏感類別可取代鑽孔資料，作為評估液化潛勢的依據
- ✚ 整合鑽孔資料、地質圖、數質地形圖和河川流域分布圖，可製作土壤液化敏感類別圖
- ✚ 國震中心研擬之土壤液化敏感圖、液化潛能指數與震陷量推估式可應用於震災境況模擬，或製作土壤液化潛勢圖

謝謝聆聽
敬請指教