

過壓密效應對土壤液化潛能影響之探討 — 以臺北盆地為例

黃富國

淡江大學水環系 教授

E-mail : fkhuang@mail.tku.edu.tw

中華民國 113 年 12 月 2 日

簡報大綱

- 1 前言
- 2 過壓密效應對抗液化強度影響及相關研究
- 3 臺北盆地過壓密比OCR特性分析
- 4 臺北盆地液化潛能分析
- 5 結論與建議



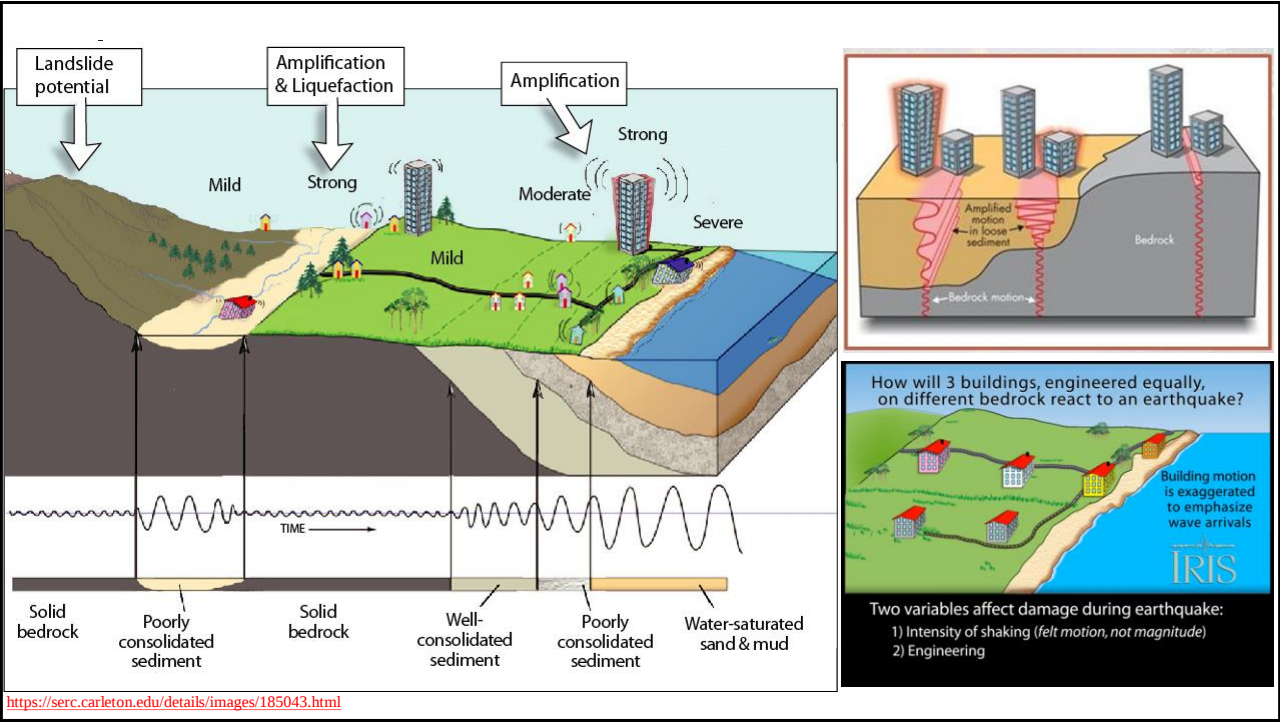
前言

1



The past is the key to the future

前事不忘 後事之師



<https://serc.carleton.edu/details/images/185043.html>





2022/09/18 池上地震 ($M_w=6.9$) ($M_L=6.8$)



2024/03/04 花蓮地震 (Mw=7.4) (ML=7.2)



Youd等人所提出之強震作用下各種沉積地形單元的液化敏感程度

Type of deposit	General distribution of cohesionless sediments in deposits	Likelihood that cohesionless sediments, when saturated, would be susceptible to liquefy (by age of deposit)			
		<500years	Holocene	Pleistocene	Prepleistocene
Continental deposits					
River channel	Locally variable	Very high	High	Low	Very low
Flood plain	Locally variable	High	Moderate	Low	Very low
Alluvial fan and plain	Widespread	Moderate	Low	Low	Very low
Marine terraces and plains	Widespread	----	Low	Very low	Very low
Delta and fan-delta	Widespread	High	Moderate	Low	Very low
Lacustrine and playa	Variable	High	Moderate	Low	Very low
Colluvium	Variable	High	Moderate	Low	Very low
Talus	Widespread	Low	Low	Very low	Very low
Dunes	Widespread	High	Moderate	Low	Very low
Loess	Variable	High	High	High	Very low
Glacial till	Variable	Low	Low	Very low	Very low
Tuff	Rare	Low	Low	Very low	Very low
Tephra	Widespread	High	High	?	?
Residual soils	Rare	Low	Low	Very low	Very low
Sebkha	Locally variable	High	Moderate	Low	Very low
Coastal zone					
Delta	Widespread	Very high	High	Low	Very low
Estuarine	Locally variable	High	Moderate	Low	Very low
Beach					
High wave energy	Widespread	Moderate	Low	Very low	Very low
Low wave energy	Widespread	High	Moderate	Low	Very low
Lagoonal	Locally variable	High	Moderate	Low	Very low
Fore shore	Locally variable	High	Moderate	Low	Very low
Artificial					
Uncompacted fill	Variable	Very high	---	---	---
Compacted fill	Variable	Low	---	---	---

Era	Period & Subperiod	Epoch & Subepoch	Age	Age (Ma)	GSSP
Cenozoic	Quaternary	Holocene	L	'Tarantian'	0.012
			M	'Ionian'	0.126
		Pleistocene	Early	'Calabrian'	0.781
				Gelasian	1.806
				Piacenzian	2.588
				Zanclean	3.600
		Pliocene			5.332
	Neogene		Miocene	Messinian	7.246
		Tortonian		11.608	
		Serravalian		13.65	
		Langhian		15.97	
		Burdigalian		20.43	
		Aquitanian		23.03	
		Oligocene		Chattian	28.4
	Rupelian		33.9		
	Paleogene	Oligocene			37.2
			Präbannonian		37.2
		Eocene	Bartonian	40.4	
			Lutetian	48.6	
		Paleocene	Ypresian	55.8	
			Thanetian	58.7	
		Paleocene	Selandian	61.7	
Danian			65.5		

Notes: P: Greenland; Vostok, Greenland; Italy; Calabria, Italy; El Jaf, Tunisia

11

2016年2月6日 美濃地震 液化案例



安南區惠安街
位於舊埤塘區
(台灣堡圖；中研院)

12

2018年2月6日 花蓮地震 液化案例





雲門翠堤大樓

蘋果即時

對照1931年古地圖顯示：
雲門翠堤大樓位於舊河道

?

雲門翠堤每小時傾斜5公分！ 搜救任務暫停

每1小時又再持續傾斜5公分





國盛二街與商校街口之雲門翠堤大樓位於舊河道上
旁側道路及多處建物有噴砂及下陷、傾斜現象



0304桃源地震 vs. 0206美濃地震液化點位

20100304 桃源地震 台南新化北勢里土壤液化



Fu-Kuo Huang

民國105年2月6日 美濃地震北勢里土壤液化↓

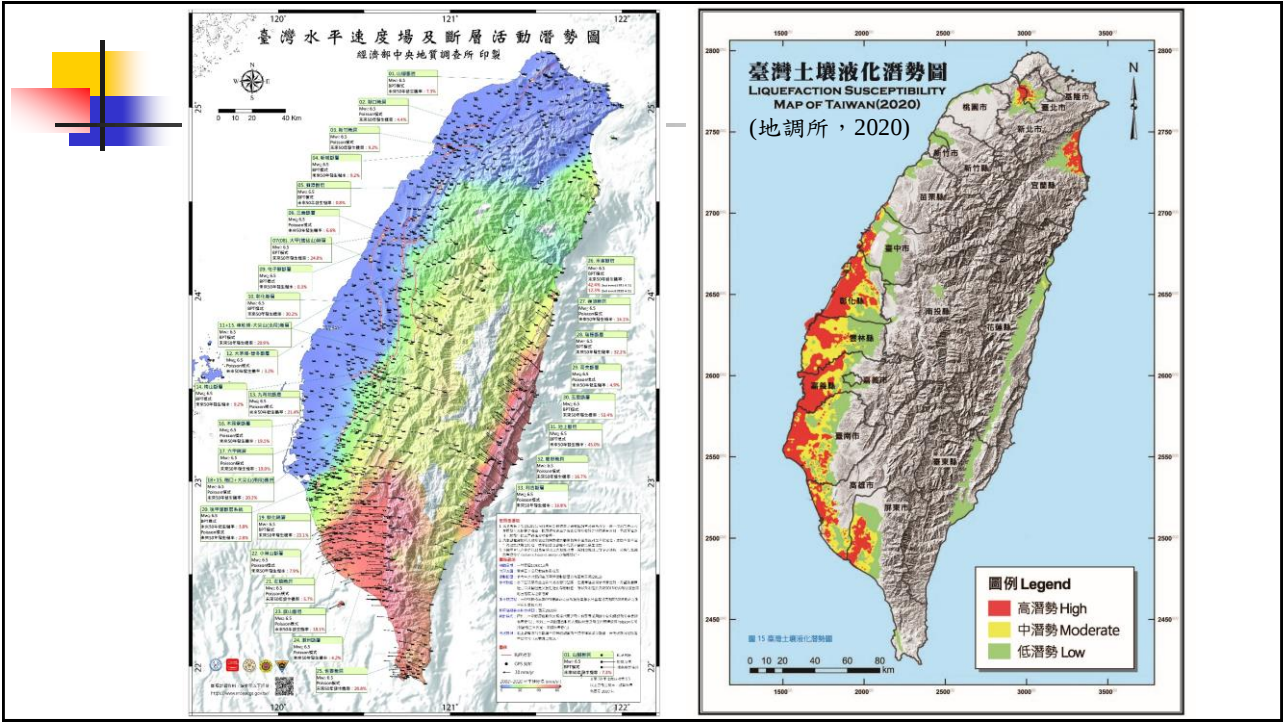
20160206 美濃地震 台南新化北勢里土壤液化

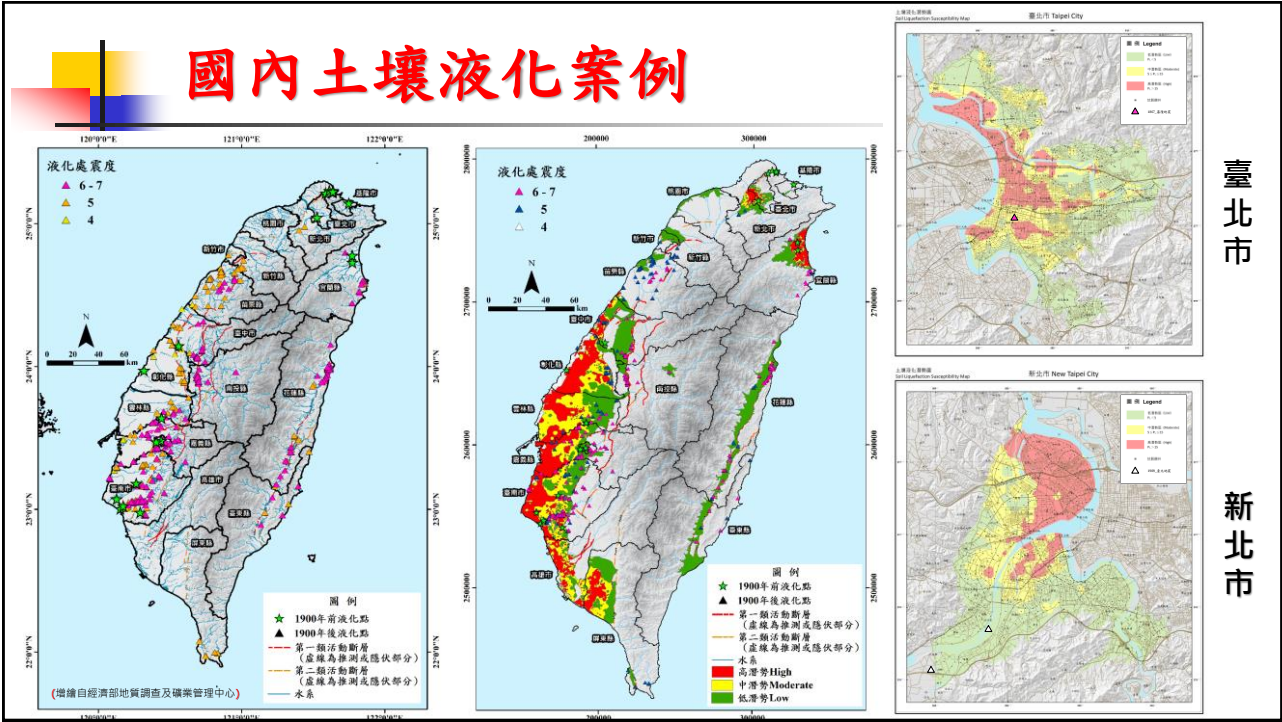


Fu-Kuo Huang

↑民國99年3月4日 桃源地震北勢里土壤液化

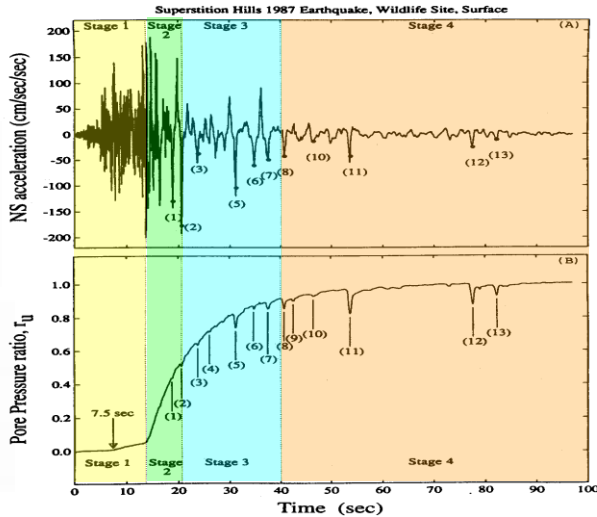
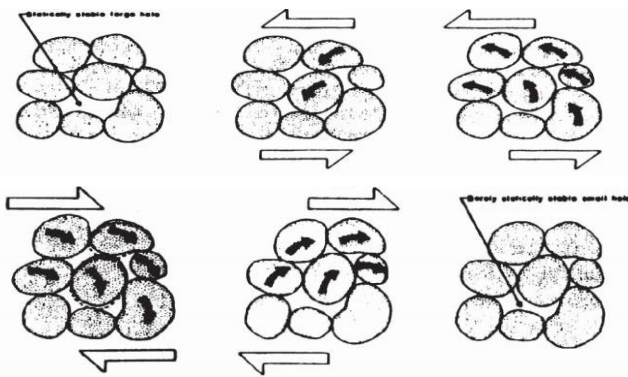
(黃富國等人, 2016)





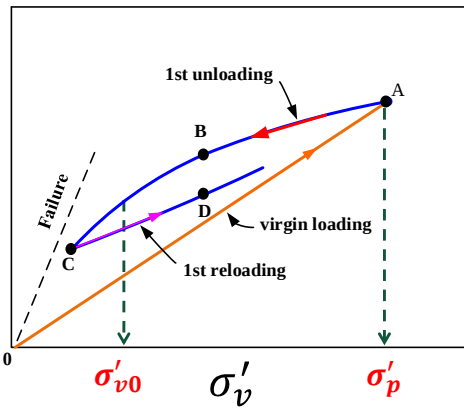
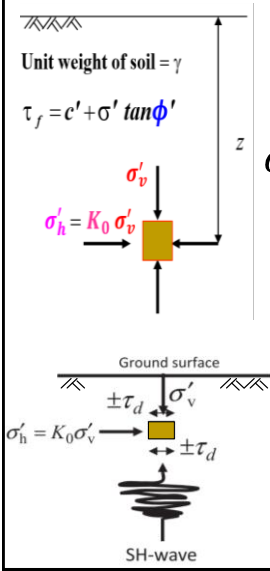
土壤液化機制 & 液化潛能評估影響因素

Packing changes of particulate group during cyclic loading (Youd, 1977)



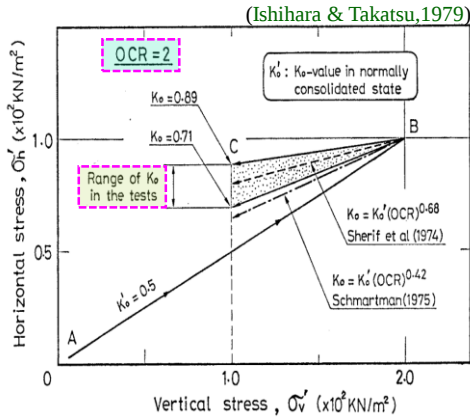
(Youd et al., 2004)

液化潛能評估影響因素- OCR & K₀



$$OCR = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v0}}$$

$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v}$$



$$K_0^{OC} = K_0^{NC}(OCR)^{\sin \phi'}$$

(Mayne and Kulhawy, 1982)

臺北盆地 - OCR 特性

(Hwang & Moh, 2020)

Overconsolidation Ratio, OCR

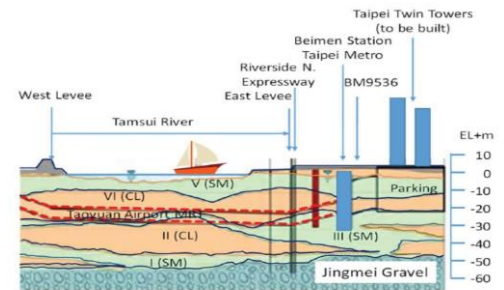
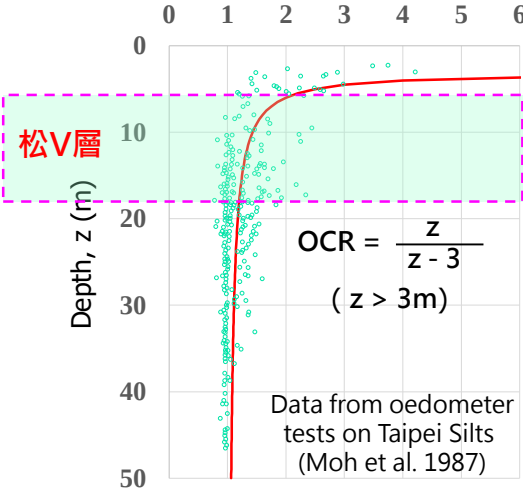


Figure 10 Geological profile under the Tamsui River and the vicinity

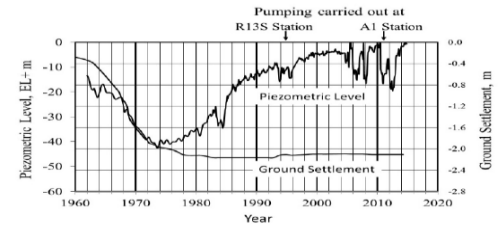
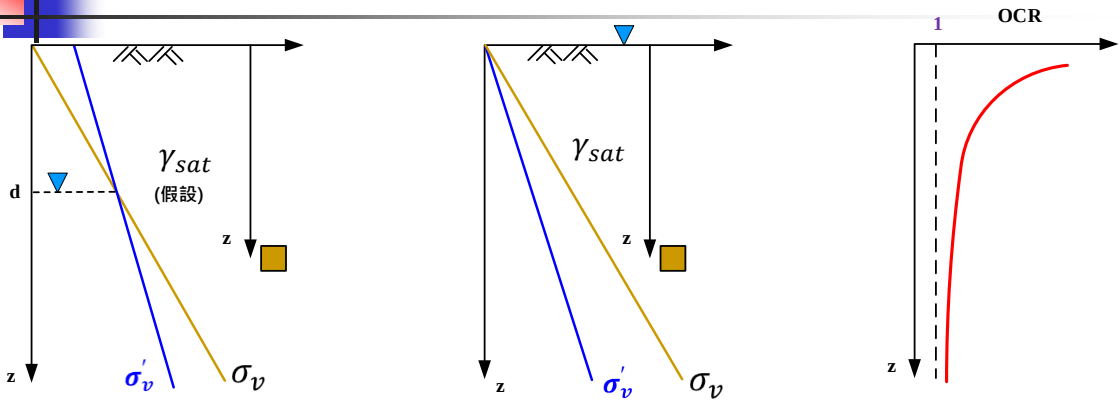


Figure 5 Piezometric level in the Jingmei Formation and ground settlement in central area of Taipei City

液化潛能評估影響因素- 地下水位變化 vs. OCR



$$\sigma'_{v1} = \gamma_{sat} z - \gamma_w(z - d) = \gamma' z + \gamma_w d$$

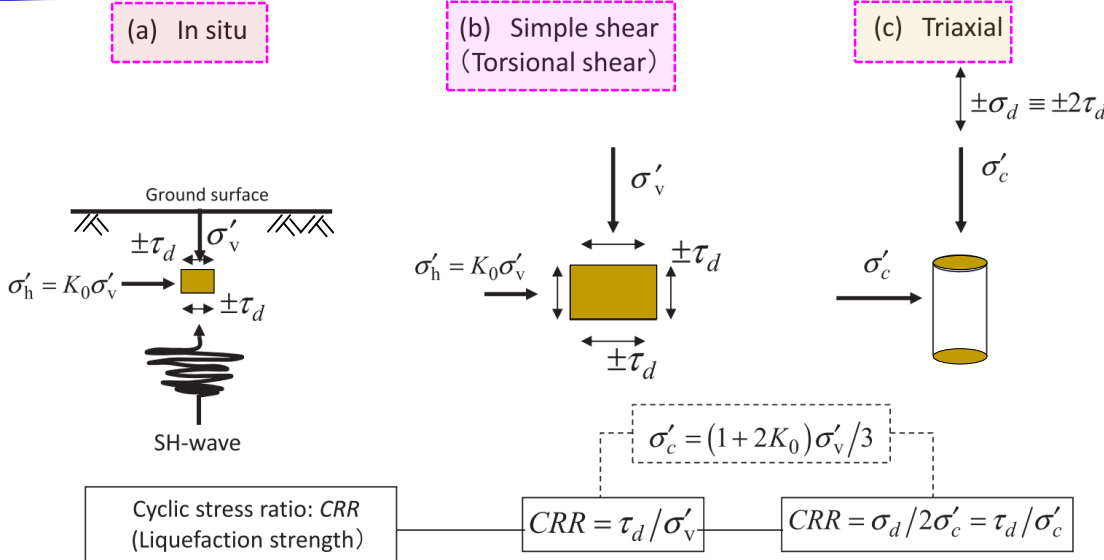
(若水位d很深: $\sigma'_{v1} = \gamma_m z$)

$$\sigma'_{v2} = \gamma_{sat} z - \gamma_w z = \gamma' z$$

$$OCR = \frac{\sigma'_{v1}}{\sigma'_{v2}} = 1 + \frac{\gamma_w d}{\gamma' z}$$

(若水位d 很深: $OCR = \frac{\sigma'_{v1}}{\sigma'_{v2}} = \frac{\gamma_m}{\gamma'}$)

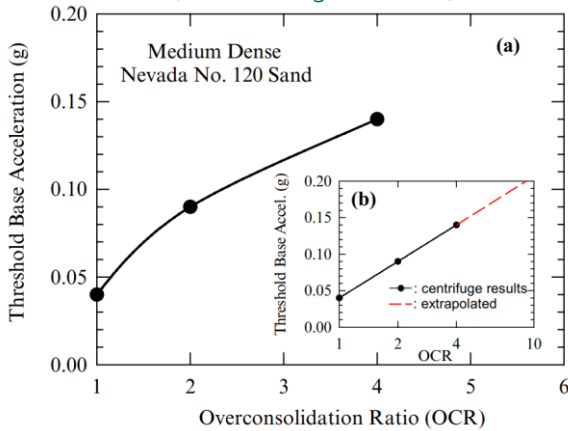
液化潛能評估影響因素- 試驗模擬 OCR & K_0



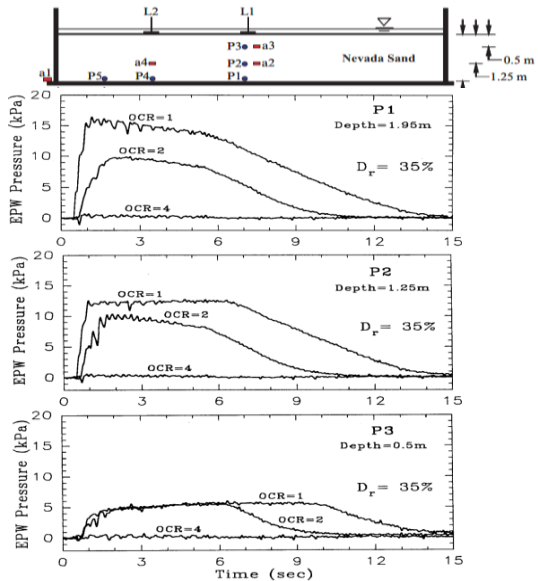
(Kokusho, 2016)

液化潛能評估影響因素- OCR effect

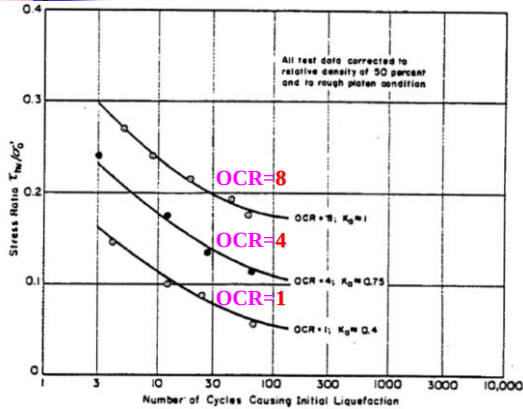
(Adalier & Elgamal, 2005)



$$a_t = 0.04 + 0.1661 \log(OCR)$$



抗液化強度CRR & 過壓密比OCR之關係(1/2)



Influence of Initial Principal Stress Ratio on Stresses Causing Liquefaction in Simple Shear Tests (Seed and Peacock, 1971)

$$\left(\frac{\tau_l}{\sigma'_{v'}}\right)_{A,OC} = \frac{1+2K_0}{3} \sqrt{OCR} \left(\frac{\tau_l}{\sigma'_{v'}}\right)_{I,NC}$$

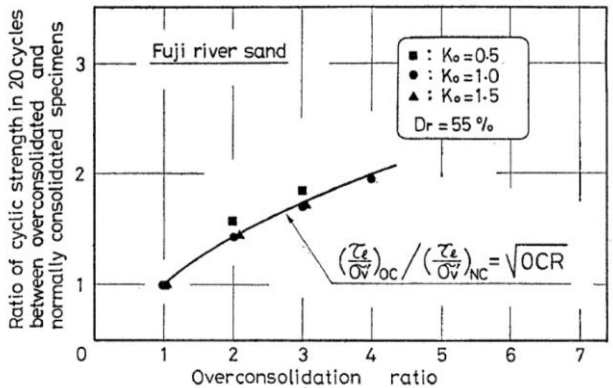


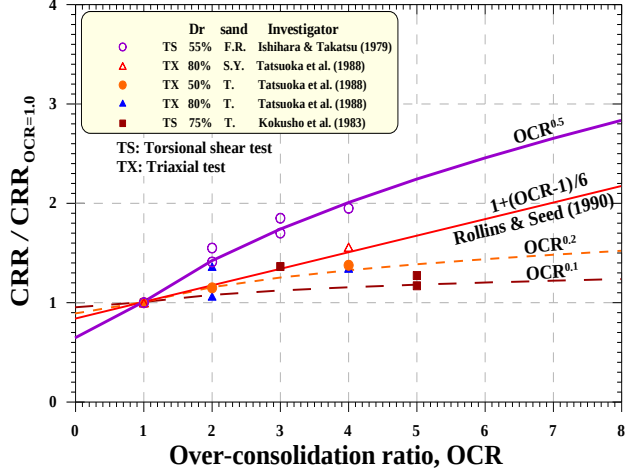
Fig. 7. Cyclic strength increase due to overconsolidation

(Ishihara & Takatsu, 1979)

$$\left(\frac{\tau_l}{\sigma'_{v'}}\right)_{OC} = \sqrt{OCR} \left(\frac{\tau_l}{\sigma'_{v'}}\right)_{NC}$$

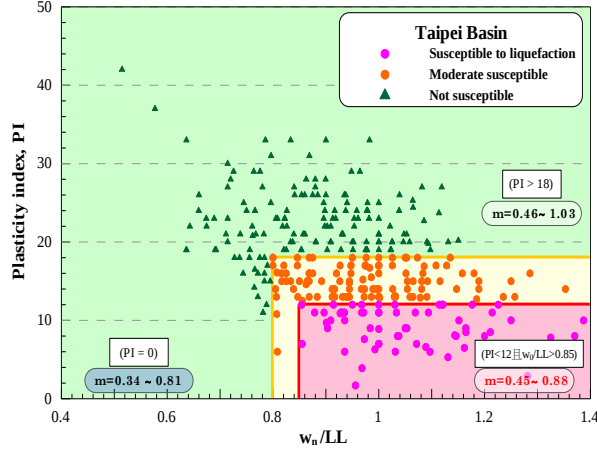
抗液化強度CRR & 過壓密比OCR之關係(2/2)

(重繪自 Kokusho(2017))



$$CRR_{OC} = CRR_{NC} (OCR)^m$$

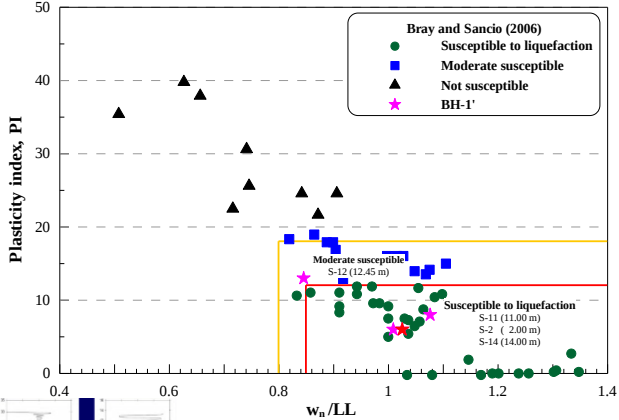
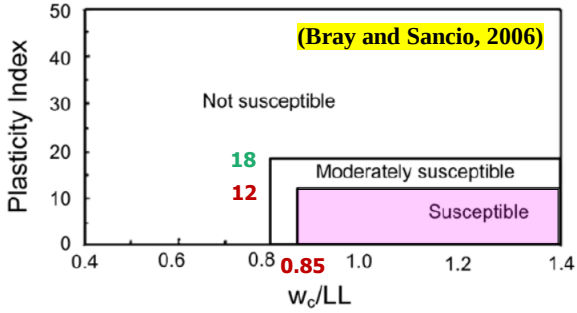
(Chen et al., 2022) (Bray and Sancio, 2006)



$$CRR_{M=7.5,OC} = CRR_{M=7.5,NC} (OCR)^m$$

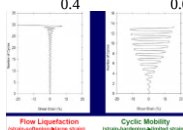
土壤液化潛能評估-細顆粒土壤反覆流動性之考慮

Cyclic Mobility → limited strain



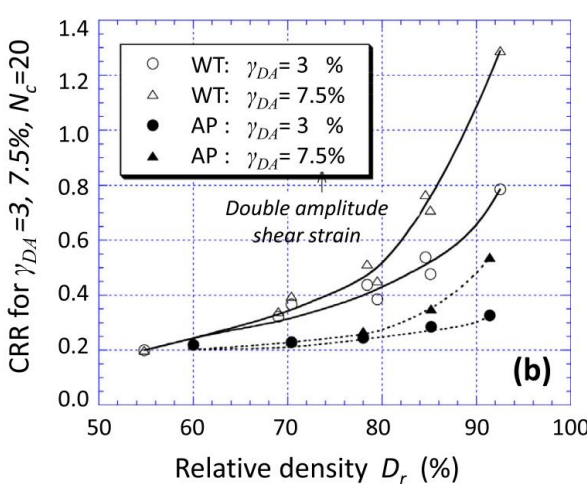
Focus on soil mineralogy & sensitivity:

- Soils with $PI \leq 12$ & $w_c/LL \geq 0.85$ can undergo cyclic mobility
- Other soils can undergo severe strength loss

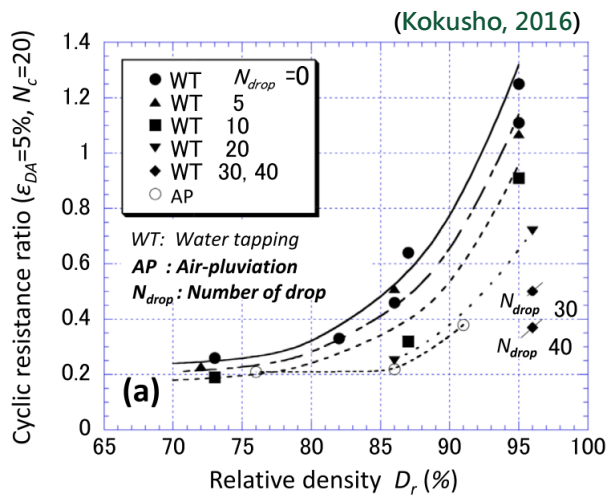


台南新化再液化場址案例
(黃富國，2020)

液化潛能評估影響因素- soil fabric effect

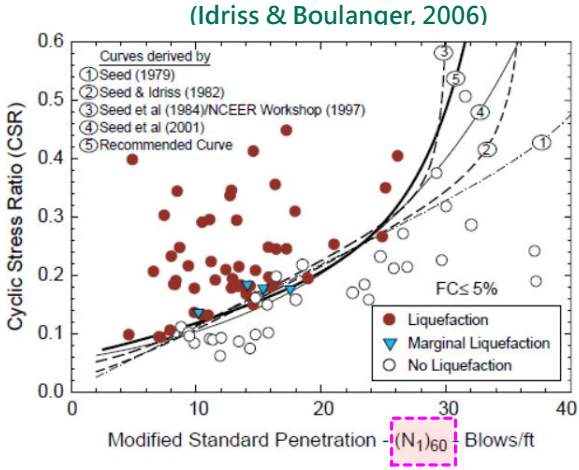
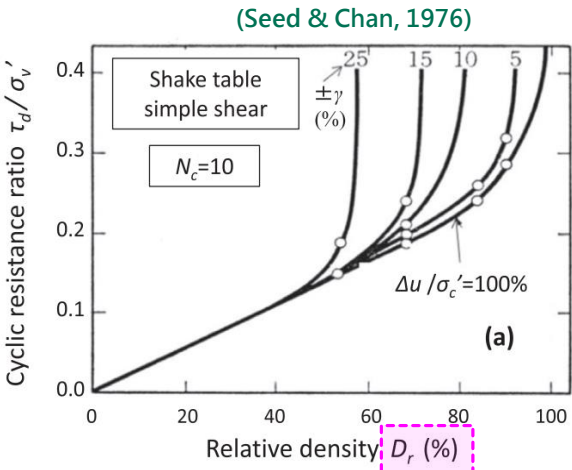


Effect of sample preparation methods on CRR of clean sands



Effect of disturbance on liquefaction resistance

常用液化潛能評估法- Seed法之發展歷程

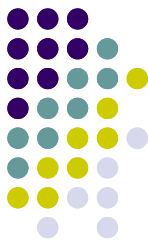


- SPT 與 D_r 有很好的相關性
- 但SPT並無法完全反映soil fabric 對CRR的效應

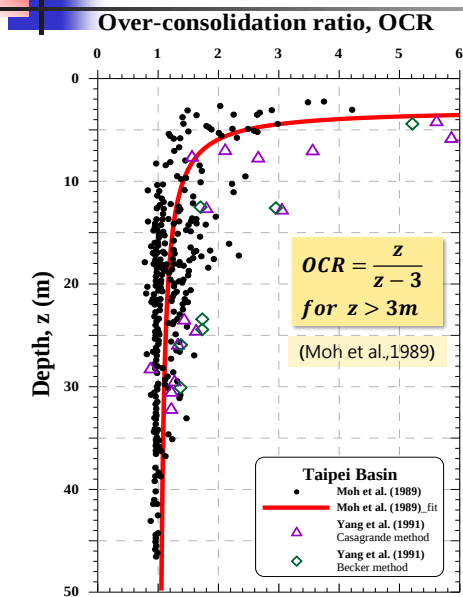
Fig. 15. Curves relating CRR to $(N_1)_{60}$ published over the past 24 years for clean sands and the recommended curve for $M=7\frac{1}{2}$ and $\sigma'_{v0}=1 \text{ atm}$ ($\approx 1 \text{ tsf}$).

臺北盆地過壓密比
OCR特性分析

3



臺北盆地土層過壓密比OCR與深度z之關係

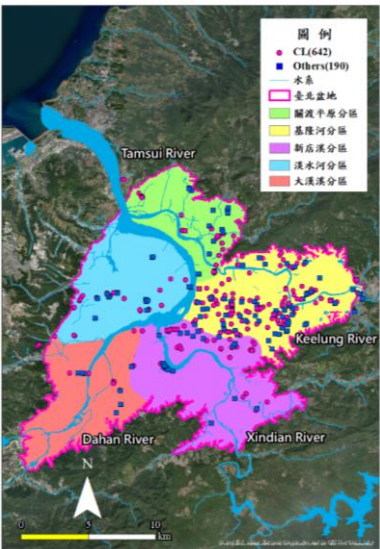


- ◆ 淺層土壤OCR較大之原因
 - 長期受地下水水位升降影響
 - 溫度乾縮
 - 毛細作用
 - 工程施作
 - ...
- ◆ OCR可能超過水位升降影響之理論最大值 2.0
- ◆ 在易發生土壤液化損害之20m深度範圍內，地層之OCR值明顯大於1.0，將可提高土壤之抗液化強度CRR，降低可能之液化災損

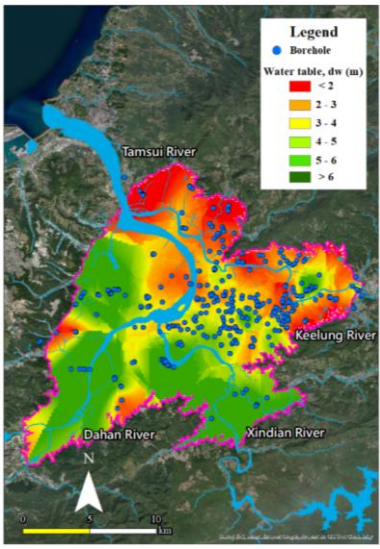
OCR分析資料來源

地質分區	關渡平原	基隆河	新店溪	淡水河	大漢溪	總計
鑽孔數目	87	363	112	77	19	658 孔
壓密試驗資料組數	118	460	137	96	21	832 組

各不同地質分區進行壓密試驗之鑽孔及組數分布情形

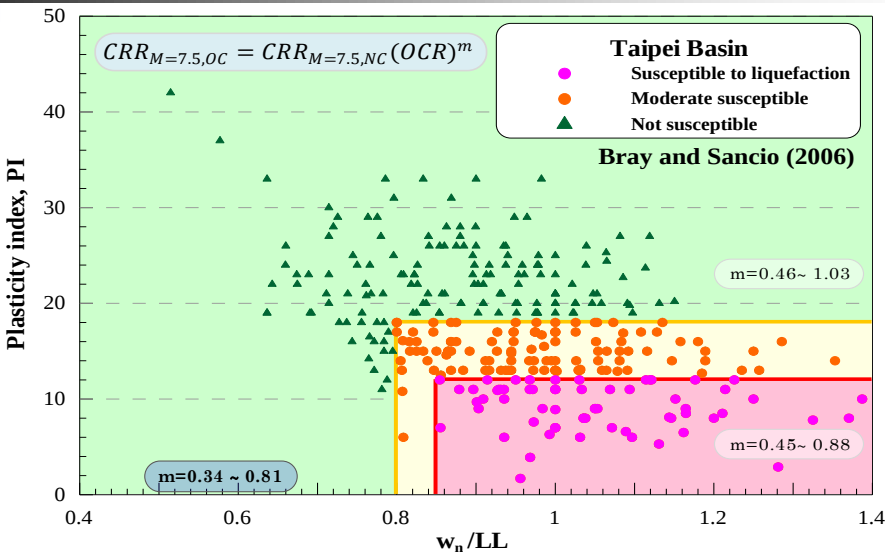


進行壓密試驗鑽孔之空間分佈圖



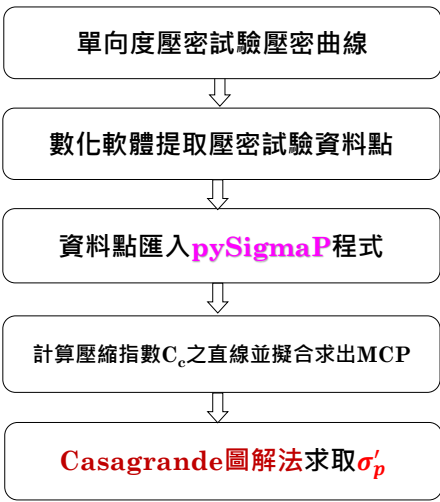
進行壓密試驗鑽孔之水位分佈圖

OCR分析資料特性

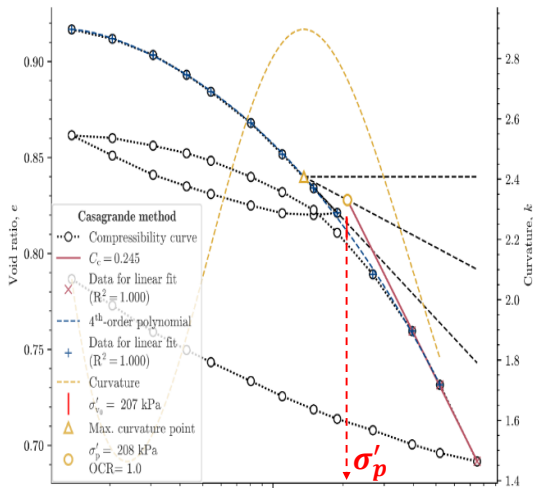


臺北盆地20m深度範圍內土樣PI與 w_n/LL 關係圖

預壓密壓力 σ'_p 及過壓密比OCR推估方法



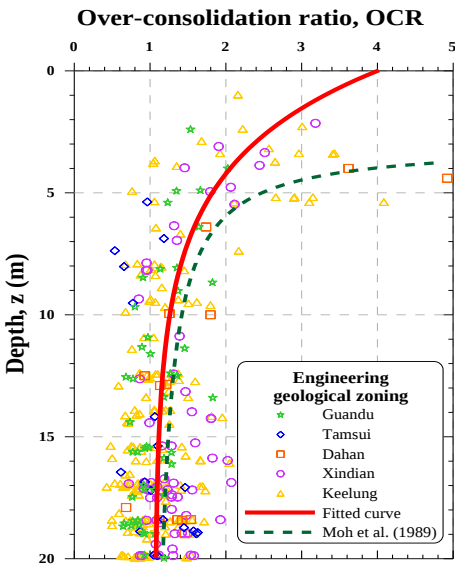
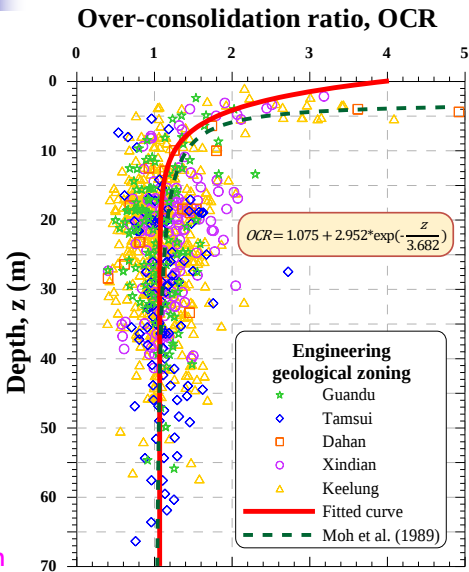
預壓密壓力 σ'_p 推估流程



$$OCR = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v0}}$$

預壓密壓力 σ'_p 推估成果

過壓密比OCR推估結果



臺北盆地 液化潛能分析

4



臺北盆地沉積環境

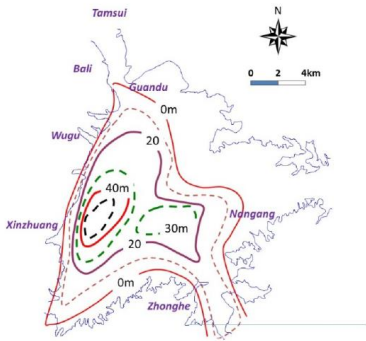


Figure 4 Contours of thickness of the Jingmei Formation (CGS)

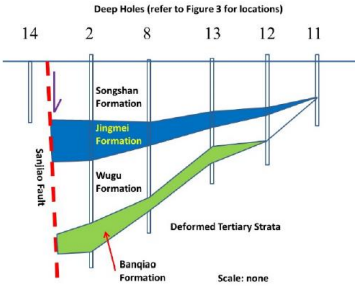
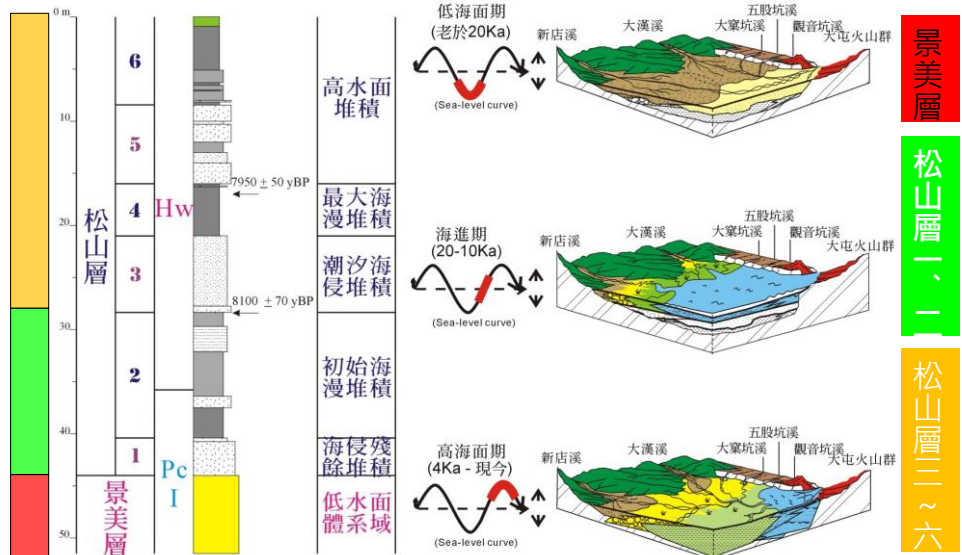


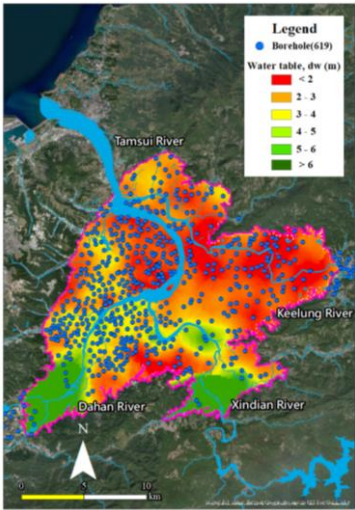
Figure 2 Schematic geological profile of the Taipei Basin

臺北盆地沈積層序與海水面變化：上次冰期以來的海進過程



(Teng et al., 2000)

鑽孔資料及震區參數



液化分析之鑽孔及水位分佈

設計地震與最大考量地震參數

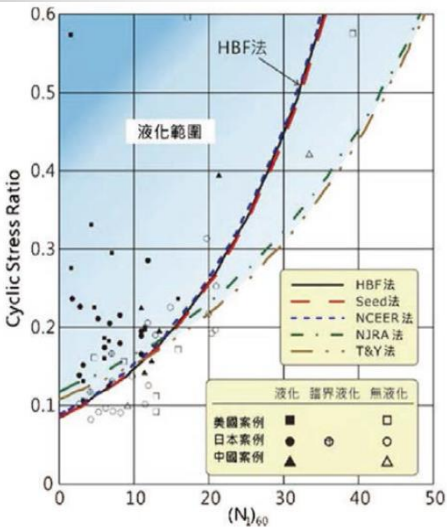
地震等級	地震規模 (Mw)	最大地表加速度(g)
設計地震	7.3	0.24
最大考量地震	7.5	0.32

設計地震地表加速度： $PGA_{DS} = 0.4g \times S_{DS}$

最大考量地震加速度： $PGA_{MS} = 0.4g \times S_{MS}$

國內常用SPT-N簡易液化潛能評估法比較

評估方法	Seed法 (NCEE修正版)	T-Y法	JRA法
地震特性參數	$a_{max} \cdot M$	$a_{max} \cdot M$	a_{max}
土壤特性參數	$N \cdot FC \cdot \sigma'_{v0}$	$N \cdot FC \cdot \gamma \cdot \sigma'_{v0}$	$N \cdot D_{50} \cdot FC \cdot \sigma'_{v0}$
SPT能量比(%)	60	80	72
反復強度	周數	15	20
	雙振幅軸向應變(%)	5	2.5~7.5
地震規模比率因子(MSF)	$(M_w/7.5)^{-2.56}$	直接在CSR表達式考慮	隱含在 $a_{max}=f(M,R)$ 中
細料含量修正(ΔN)	$f_1((N_1)_{60}, FC)$	$f_2(FC)$	$f_3(N_1, FC)$
有效覆土壓力修正(C_N)	$2.2/(\sigma'_{v0}/Pa + 1.2) \leq 1.7$	$1.7/(\sigma'_{v0}/Pa + 0.7)$	$1.7/(\sigma'_{v0}/Pa + 0.7)$
應力折減係數(r_d)	$f(z)$	$1-0.015z$	$1-0.015z$
剪應力特性	等值均勻振幅	等值均勻振幅	最大值
方法特性	半經驗法	半經驗法	半經驗法
驗證方法	現場液化與否資料	現場液化與否資料	現場FS分布資料
安全係數	1.25~1.5	1.5 ($N_1 \leq 10$) 1.3 (中度及緊密砂)	1.0
相關空間損害指數	—	—	I_L 或 P_L
參考文獻	Seed et al. (1985) Youd et al. (2001)	Tokimatsu & Yoshimi (1983)	日本道路協會 (1990, 1996)



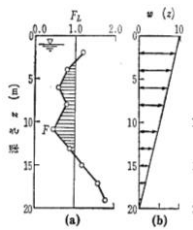
(黃富國，2008) (彭振聲等人，2018)

土壤液化損害參數^(1/2)

■ 液化潛能指數 P_L

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

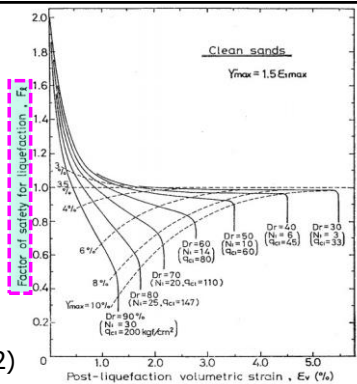
(Iwasaki et al., 1982)



■ 液化後沉陷量 S_t

$$S_t = \int_0^{20} \varepsilon_v(z) dz$$

(Ishihara & Yoshimine, 1992)



液化潛能指數 P_L	液化程度	結構損害程度	沉陷量 S_t (cm)	地表損害程度及現象
0	沒有或極少液化	輕至無損壞	$0 < S_t \leq 10$	輕至無之損壞，地表有微細裂縫
$0 < P_L \leq 5$	輕微液化	中度損壞	$10 < S_t \leq 30$	中度損害，地表有小裂縫，砂滲出
$5 < P_L \leq 15$	中度液化	廣泛損壞	$30 < S_t \leq 70$	廣泛損害，地表有大裂縫、噴砂、大位移
$P_L > 15$	嚴重液化			

39

土壤液化損害參數^(2/2)

■ 液化機率指數 P_w

$$P_w = \frac{\int_0^{20} P_{Liq}(z) \cdot w(z) dz}{\int_0^{20} w(z) dz}$$

(黃富國，2008)

液化損害程度分類	液化機率指數 P_w	液化損害程度
I	$P_w < 0.30$	輕微液化
II	$0.30 \leq P_w \leq 0.85$	中度液化
III	$P_w > 0.85$	嚴重液化

土壤液化機率^(1/2)

■ 邏輯迴歸液化機率模式 (黃富國，2008)

□ JRA form

$$P_{Liq} = \frac{1}{1 + \exp\{-[8.1 - 0.236(N_a)_{72} + 4 \ln(CSR_{JRA})]\}}$$

□ T-Y form

$$P_{Liq} = \frac{1}{1 + \exp\{-[10.652 - 0.287(N_a)_{80} + 3.833 \ln(CSR_{T-Y})]\}}$$

□ Seed form

$$P_{Liq} = \frac{1}{1 + \exp\{-[10.097 - 0.245(N_1)_{60,cs} + 3.757 \ln(CSRN)]\}}$$

土壤液化機率^(2/2)

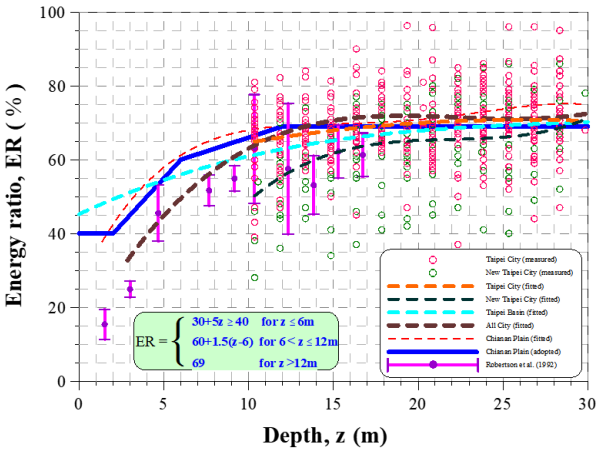
■ 貝氏映射液化機率模式(黃富國，2008; Juang et al., 2002)

$$P_{Liq} = \frac{1}{1 + \left(\frac{FS}{A}\right)^B}$$

評估法		迴歸係數	
		A	B
SPT評估法 (黃富國，2008)	Seed 法	0.8068	3.9624
	T-Y 法	0.8828	4.7776
	JRA 法	0.8031	4.1356

考慮過壓密效應之液化潛能與損害評估

$ER = 45.229 + 2.157z - 0.066z^2 + 0.00072z^3$



臺北盆地鑽桿能量比ER與深度z之迴歸關係

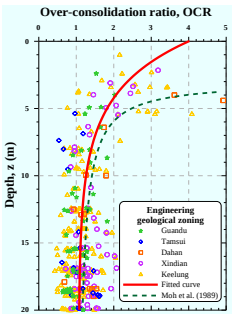
考慮過壓密效應之抗液化安全係數

$FS = \sqrt{\frac{OCR}{CSR}} \frac{CRR}{CSR}$

相對誤差(或相對保守程度)

$\Delta P_L = P_L - P_{L,OCR}$

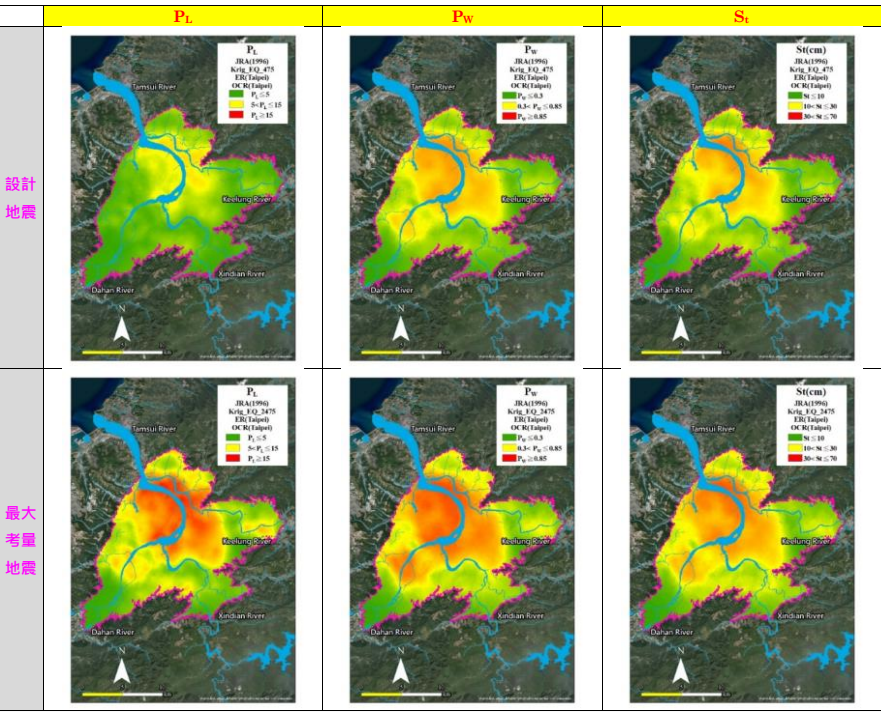
$RE_{P_L,OCR}(\%) = \frac{P_L - P_{L,OCR}}{P_{L,OCR}} * 100\%$

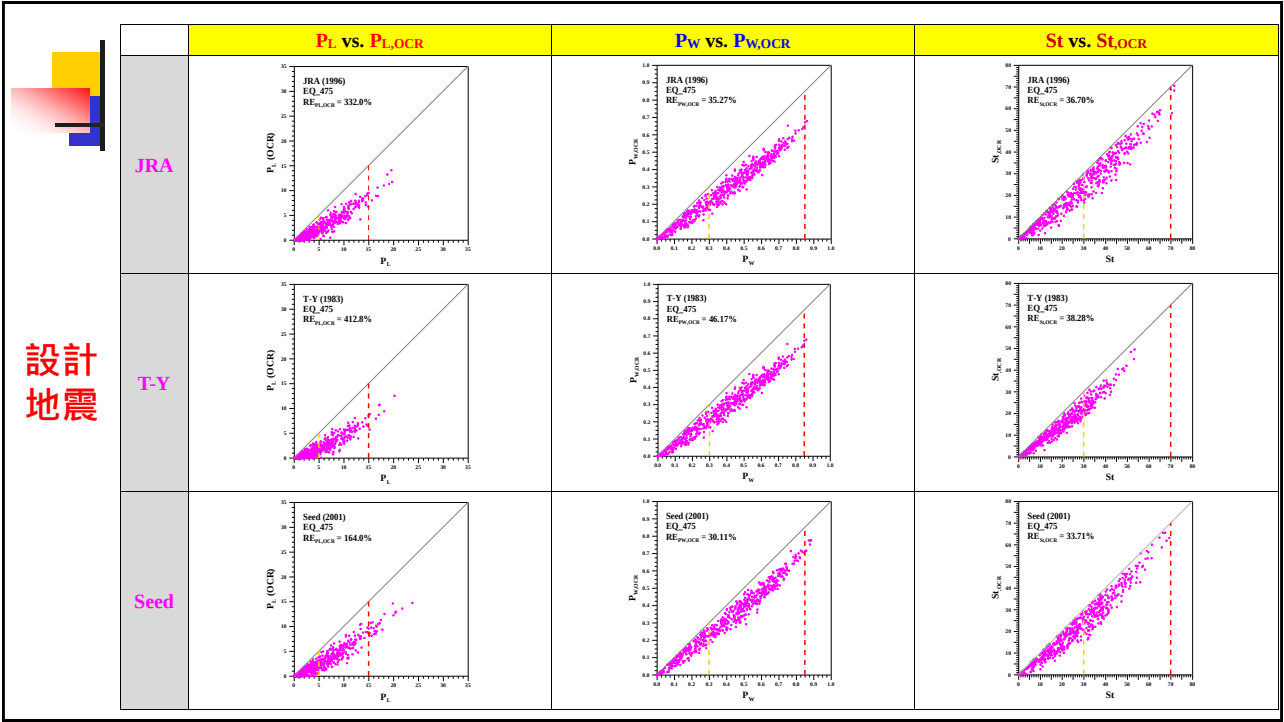
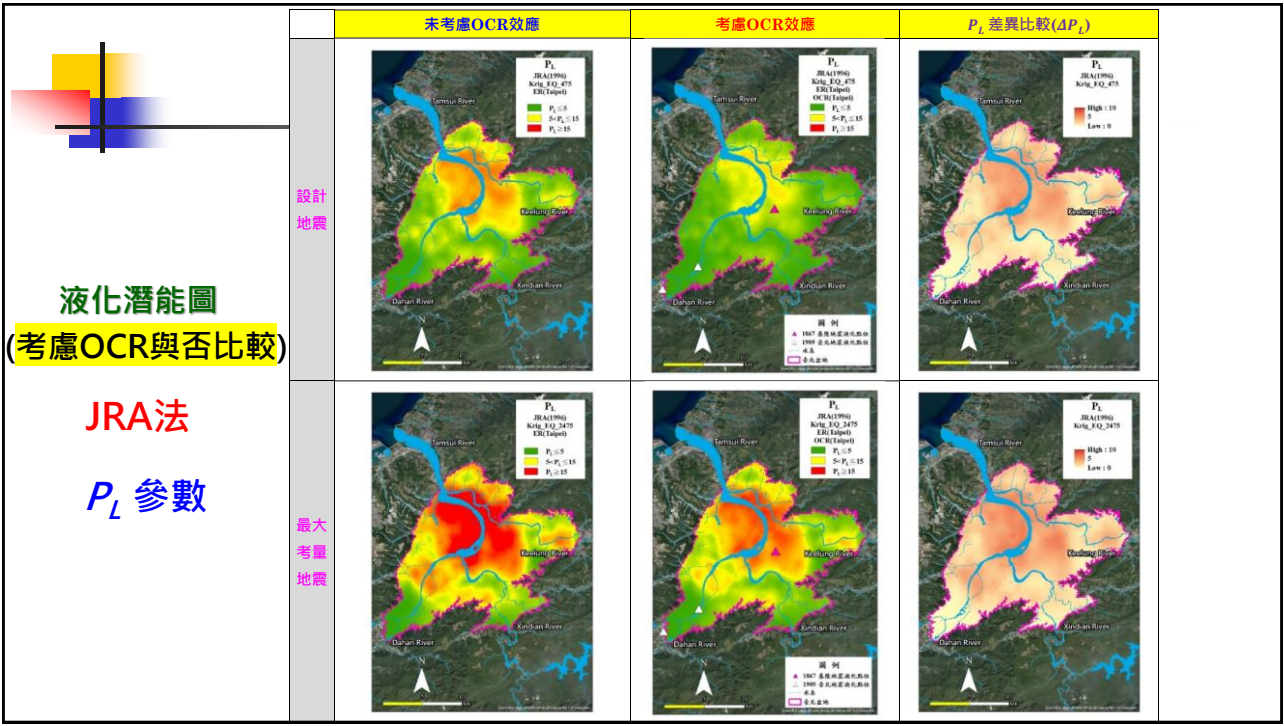


液化潛能圖

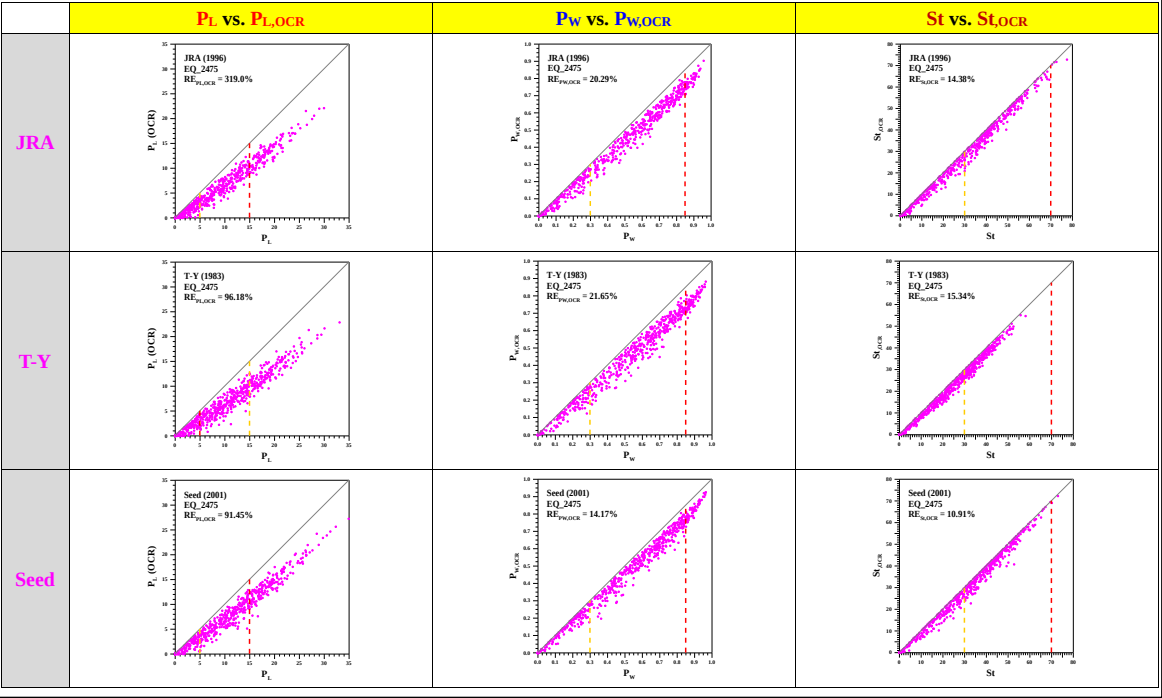
(考慮過壓密效應)

JRA法



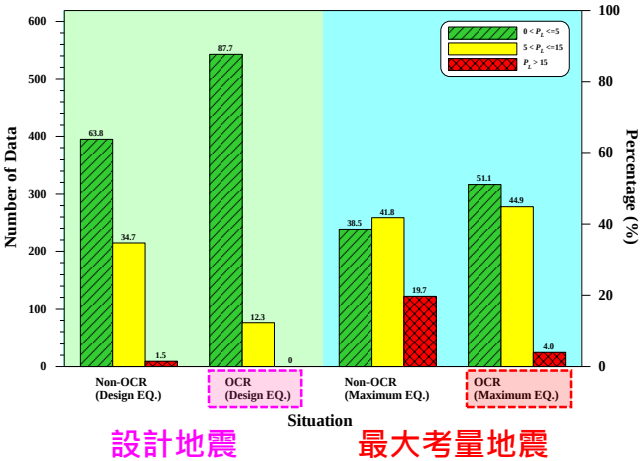


最大
考量
地震



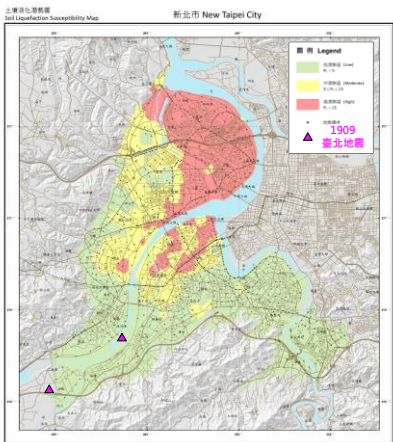
考慮OCR效應與否對液化潛能分級之影響

地震 境況	OCR效應	液化潛能分級		
		低($0 < P_L \leq 5$)	中($5 < P_L \leq 15$)	高($P_L > 15$)
設計 地震	未考慮 OCR效應	395 (63.8%)	215 (34.7%)	9 (1.5%)
	考慮 OCR效應	543 (87.7%)	76 (12.3%)	0 (0%)
最大 考量 地震	未考慮 OCR效應	238 (38.5%)	259 (41.8%)	122(19.7%)
	考慮 OCR效應	316 (51.1%)	278 (44.9%)	25 (4.0%)

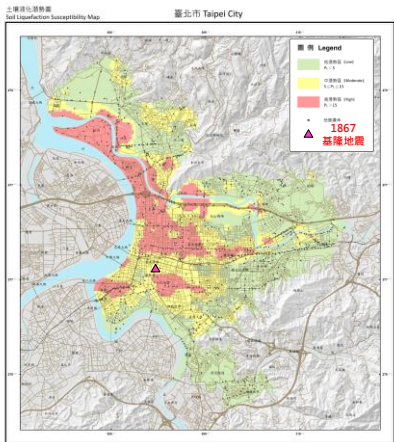


液化潛能分級與歷史液化案例對比

新北市



台北市



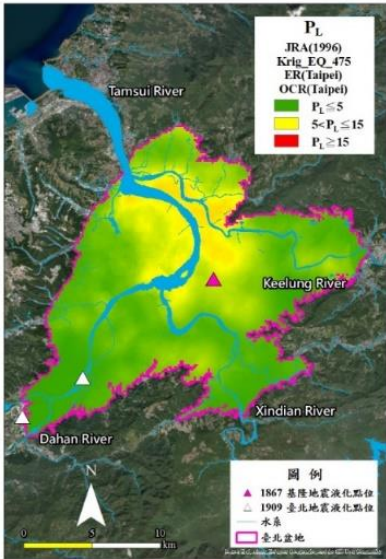
地震	發震日期	震矩規模 (M _w)	地震規模 (M _L)	液化位置	液化表現
基隆地震	1867/12/18	7.0	6.8	臺北市中正區	地裂
臺北地震	1909/04/15	7.4	7.0	新北市土城區	堤防及護岸工程崩壞 道路回填地龜裂二處

(鄭世楠，2020)

液化潛能分級與歷史液化案例對比

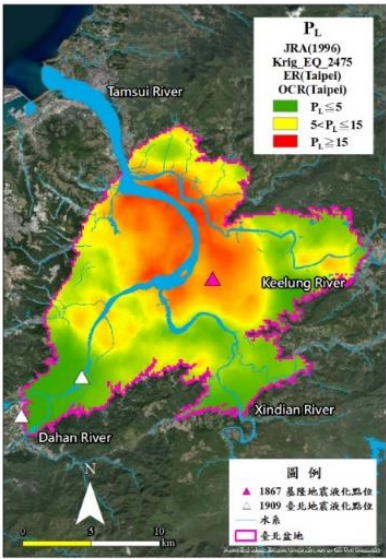
設計地震

(考慮過壓密效應)



最大考量地震

(考慮過壓密效應)





結論與建議

5




結論與建議 (1/3)

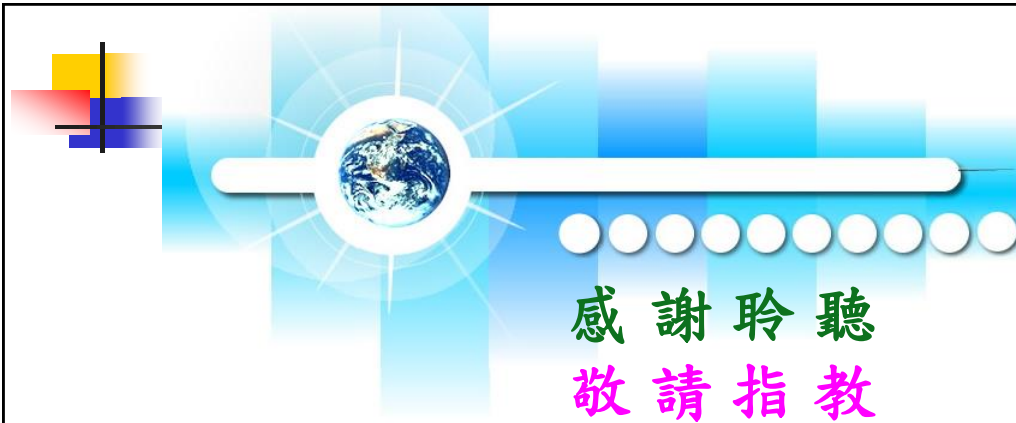
- ◆ 由於土壤液化易發生於近地表20m深度範圍內，由此過壓密現象所引致之土層平均圍壓增加，及土壤組構之強化效應，過去並未適當反映於土壤液化潛能及損害程度之評估上，值得關注。
- ◆ 不論非塑性土壤或塑性土壤，土壤之抗液化強度CRR均隨過壓密比OCR之增加而增加。對具液化潛勢之非塑性土壤而言，CRR可依與過壓密比平方根 $\sqrt{OCR}$ 成正比進行推估；對可能發生反復流動性之塑性土壤而言，當土壤之塑性及可壓縮性增加時，過壓密對CRR之影響更形顯著，亦即，過壓密效應也可降低土壤強度受震減弱可能引致之危害。因此，將過壓密效應納入液化評估考量，有其積極意義。

結論與建議 (2/3)

- ◆ 根據本研究納入過壓密效應考慮之設計地震情境分析結果，可發現**臺北盆地**原屬高液化潛勢之場址，全部降低為中潛勢，而中潛勢場址之比例則降低了22.4%，低潛勢場址之比例對應增加了23.9%，可見**過壓密對降低液化潛在危害具有顯著效應，對液化潛勢分級具有明顯影響**。另於最大考量地震情境時，高潛勢場址之百分比大幅降低了15.7%，顯示當地震作用力較大時，過壓密效應對降低高潛勢場址所可能產生之嚴重液化危害，功效特別顯著。

結論與建議 (3/3)

- ◆ 與北台灣過去二次強震引致之歷史液化點位作對比，**本研究成果較地礦中心目前所公告之土壤液化潛勢圖資合理，因臺北盆地過去並未有大大區域明顯液化之歷史紀錄**。然而，對照所蒐集之三處液化點位案例，皆係發生於分析成果之中低液化潛勢區域，顯見目前慣用之簡易液化評估法仍有不足之處，所以除**建議將過壓密OCR效應納入液化評估考量**之外，後續仍須對影響液化潛能及損害之其他可能因素，持續深入研究與探討！



感謝聆聽
敬請指教

聯絡&交流方式: 黃富國 教授
淡江大學 水資源及環境工程學系
(25137) 新北市 淡水區 英專路 151號
Tel: (02)2621-5656 Ext. 2750
(M) 0928-666-235
E-mail: fkhuang@mail.tku.edu.tw