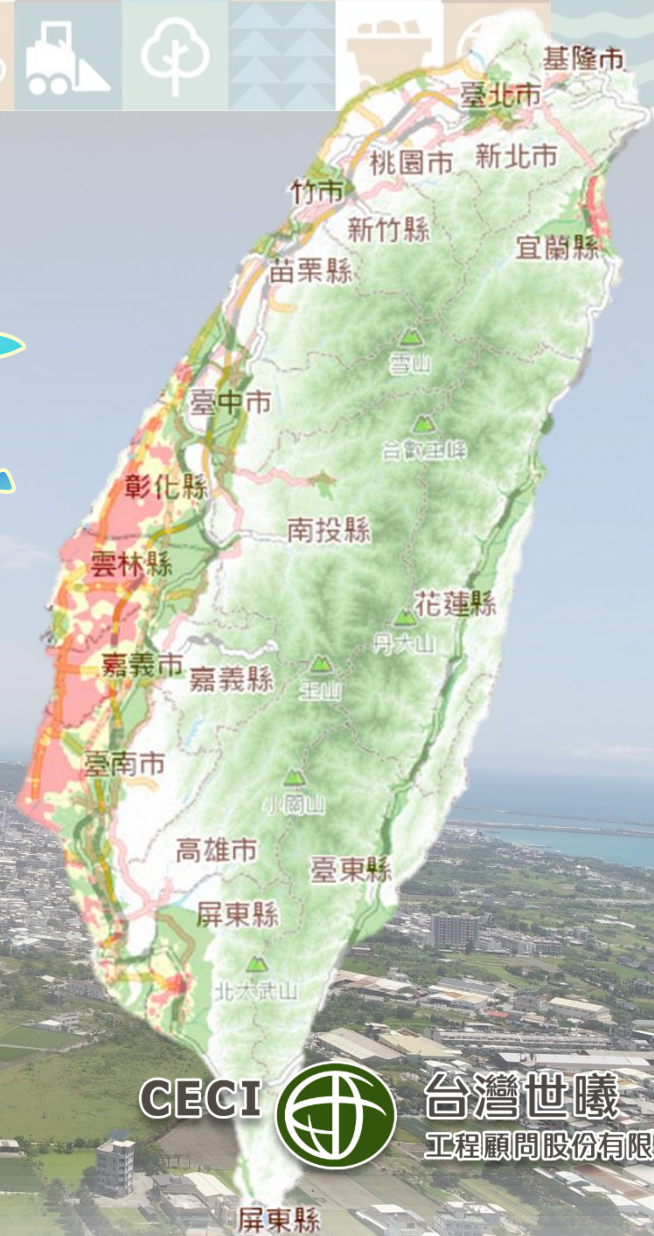




經濟部地質調查及礦業管理中心

GEOLOGICAL SURVEY and MINING MANAGEMENT AGENCY, MINISTRY of ECONOMIC AFFAIRS

低塑性黏土之 土壤液化探討



葉家志 地質師

中華民國113年12月

CECI



台灣世曦
工程顧問股份有限公司

大綱

低塑性黏土液化分析方法之差異 >

1

低塑性黏土受震行為 >

2

低塑性黏土動三軸試驗成果 >

3

結論 >

4

低塑性黏土液化分析方法之差異

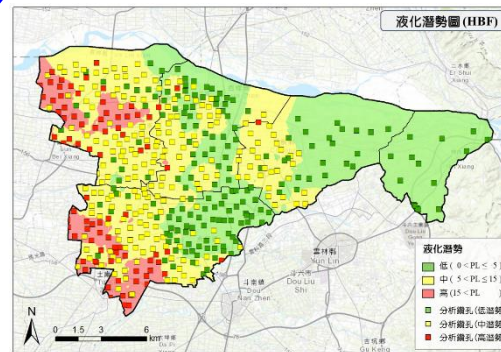
I

各分析方法圖資差異

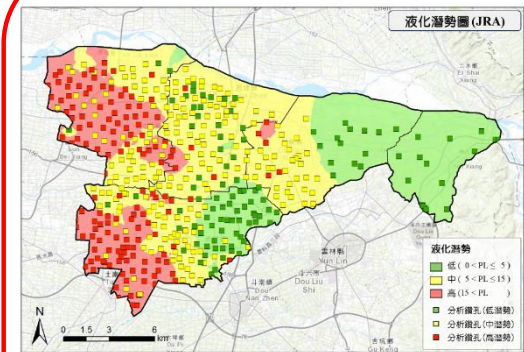
➤ 建築物基礎構造設計規範(112)

- HBF(2012)
- JRA(1996)
- NCEER(2001)
- AIJ(2001)

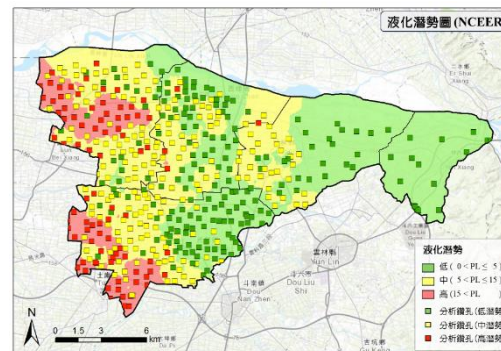
分析結果相近



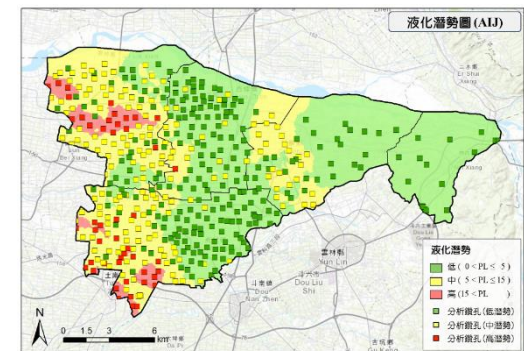
HBF



JRA (最保守)



NCEER

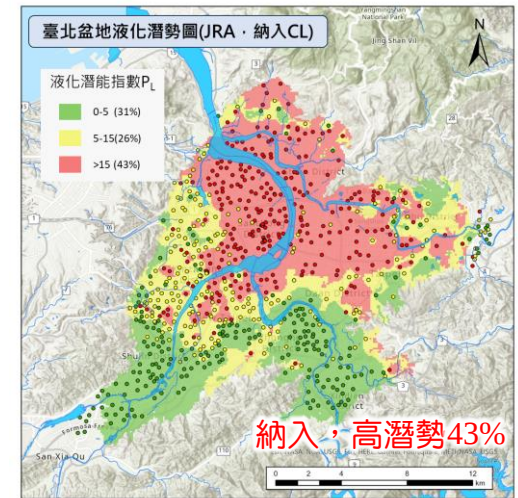
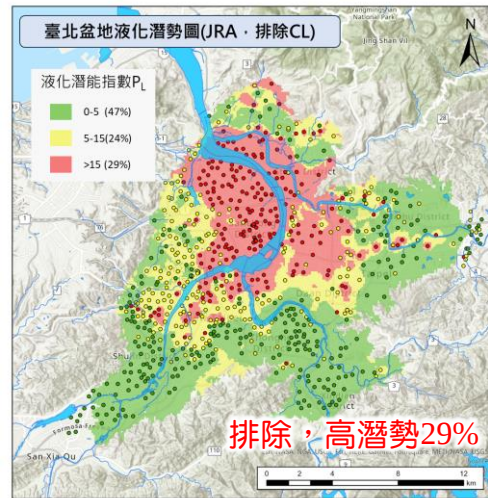
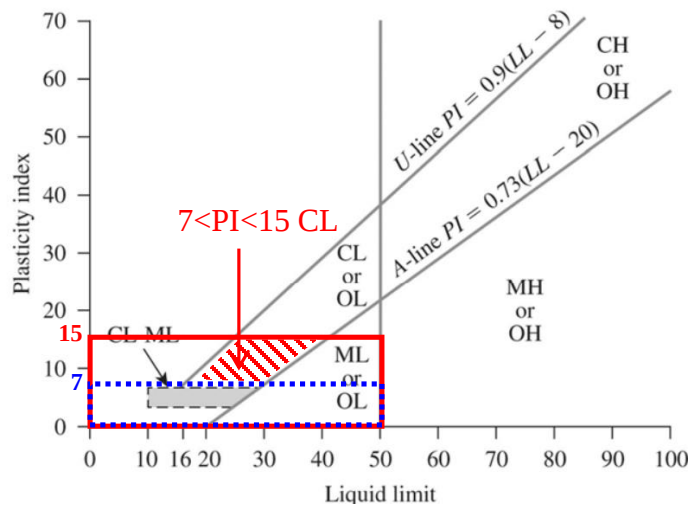


AIJ (最樂觀)

低塑性黏土液化分析方法之差異

各分析方法適用之土壤

分析方法	NCEER (2001)	JRA (1996)	HBF(2012)
研究背景/ 案例來源	世界地震 規模7.5案例 (改自Seed法)	日本地震案例 (1995阪神地震後修正)	臺灣及世界 地震案例 (參考Seed法)
須納入考量 土壤類型	砂土(Sand)	細料含量 $FC \leq 35\%$ 或 $FC > 35\%$ 且 $PI < 15$	塑性指數PI在7以下之土層



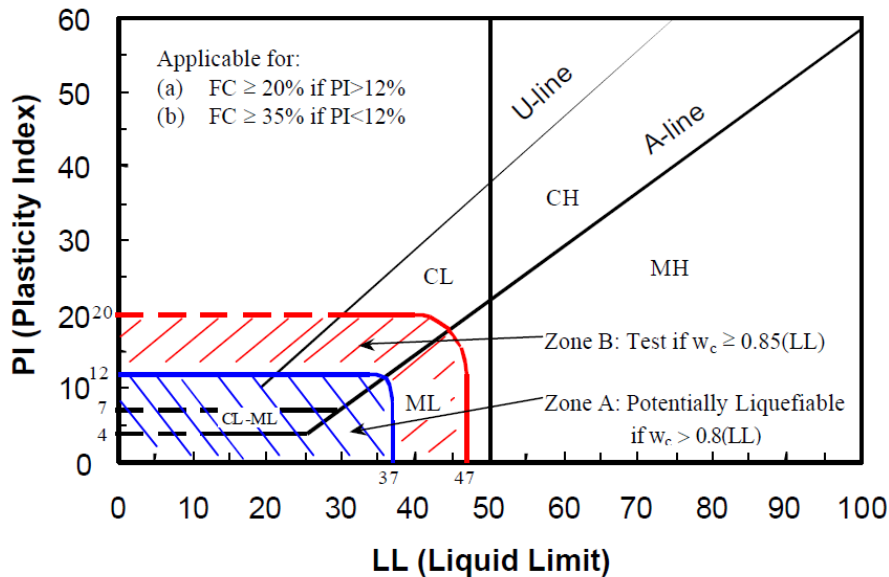
低塑性土壤液化分析方法之差異

I

液化潛勢與PI及 W_c/LL 之關係

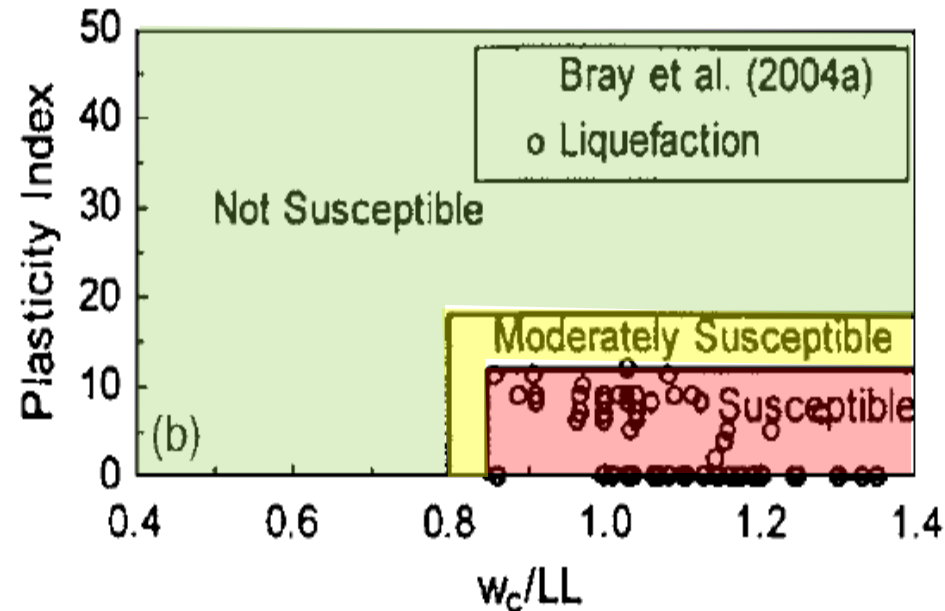
➤ Seed et al. (2003)

- Zone A : $PI \leq 12$ 、 $LL \leq 37$ 、 $W_c/LL \geq 0.80$
- Zone B : $12 < PI \leq 20$ 、 $LL \leq 47$ 、 $W_c/LL \geq 0.85$
or $PI \leq 12$ 、 $37 < LL \leq 47$ 、 $W_c/LL \geq 0.85$



➤ Bray et al. (2006)

- 高潛勢 : $PI \leq 12$ 、 $W_c/LL \geq 0.85$
- 中潛勢 : $12 < PI \leq 18$ 、 $W_c/LL \geq 0.80$
or $PI \leq 12$ 、 $W_c/LL = 0.8 \sim 0.85$



低塑性黏土受震行為

2 液化行為探討

1. 土壤液化 (Soil Liquefaction)

- **定義:** 土壤液化是指在飽和土壤中，由於外部應力（通常是地震）作用下，土壤的強度和剛度顯著降低，導致其行為類似液體的現象。
- **機制:** 當地震作用下，土壤中的孔隙水壓力上升到與有效應力相等的程度，土壤顆粒之間的接觸力消失，土壤會暫時表現為流體狀態，失去承載能力。
- **結果:** 這可能導致嚴重的地面變形，如側向擴展、滑動，甚至可能導致建築物的倒塌。

2. 反覆流動 (Cyclic Mobility)

- **定義:** 指在循環荷載作用下，土壤逐漸積累變形，即使土壤未完全液化的情況。
- **機制:** 在循環荷載下，土壤可能經歷交替的收縮和膨脹，導致孔隙水壓力波動，但不一定會達到完全液化。然而，這些波動會導致土壤隨著時間逐漸變形。
- **結果:** 土壤部分仍保持穩定，但隨著時間的推移，可能會導致建築物的傾斜或沉降。

主要區別:

- **土壤液化** 是一種更極端的情況，土壤幾乎失去所有強度，而**反覆流動** 是指在反覆荷載下土壤變形積累，但未完全失去強度。
- **土壤液化** 通常與突發性失效相關，而**反覆流動** 則可能導致逐漸的損害。

低塑性黏土受震行為

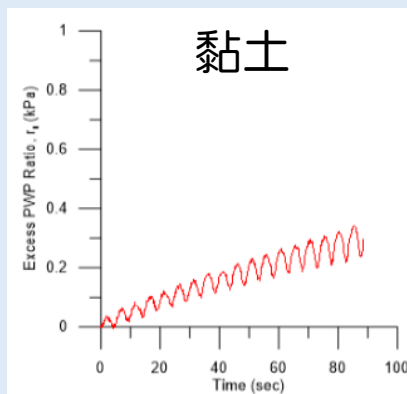
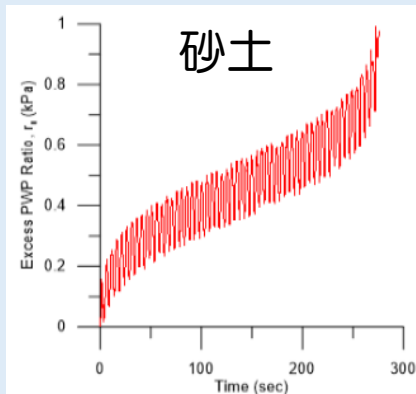
2 動三軸應力-應變行為

► 動三軸試驗

- $Ru = \text{孔隙水壓}/\text{壓密應力} \geq 0.9$
- 雙軸向應變 $\geq 5.0\%$

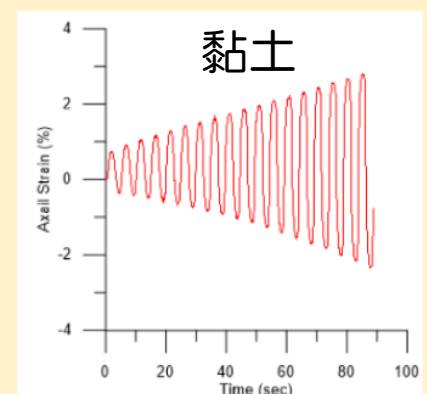
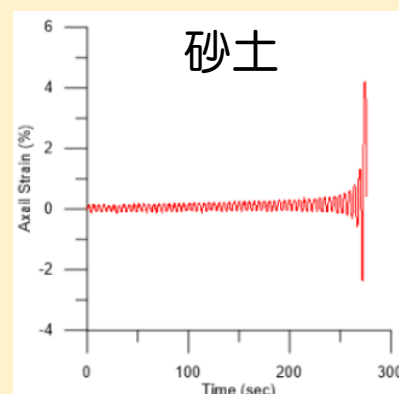
1. 孔隙水壓力反應

- 砂土：孔隙水壓增加，有效應力減少，最終可能導致液化
- 黏土：孔隙水壓積累通常較慢，且變化幅度小



2. 應力-應變行為

- 砂土：液化前，應力-應變曲線顯示應力迅速下降，應變大幅上升
- 黏土：應力-應變曲線通常較為平緩，循環荷載下塑性變形累積

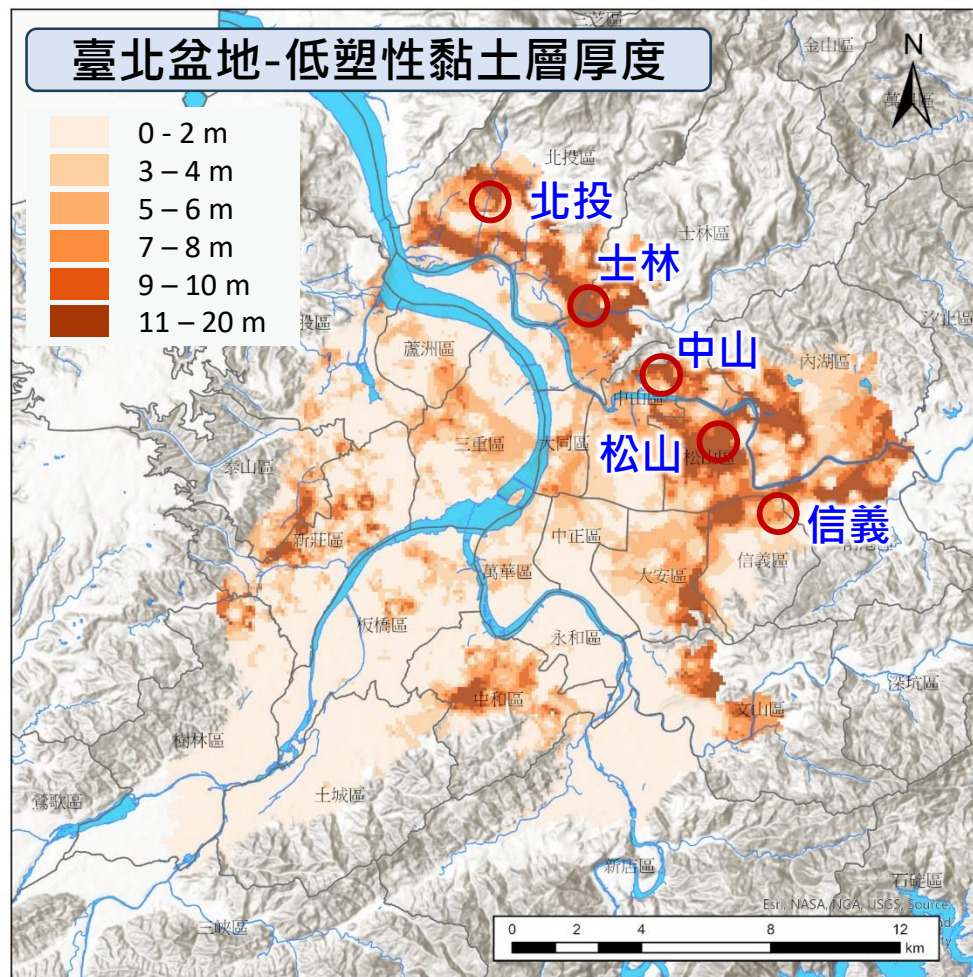


低塑性黏土動三軸試驗成果

3

動三軸土壤試體位置

鑽孔編號	鑽孔位置
113-TP01	中央北路二段257巷 (臺北市北投區)
113-TP02	中正高中 (臺北市北投區)
113-TP03	中429公園 (臺北市中山區)
113-TP04	民權公園 (臺北市松山區)
113-TP05	雙永國小 (臺北市信義區)



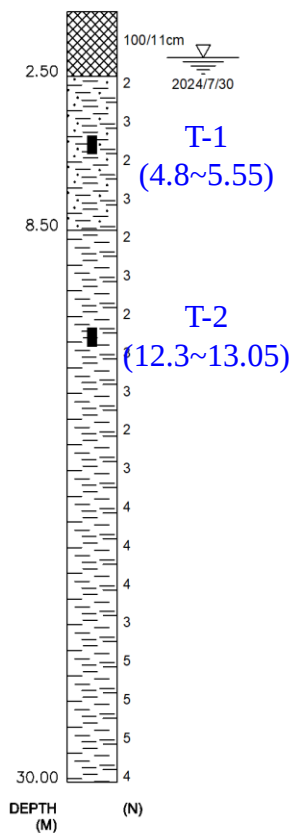
低塑性黏土動三軸試驗成果

3

動三軸土壤試體深度

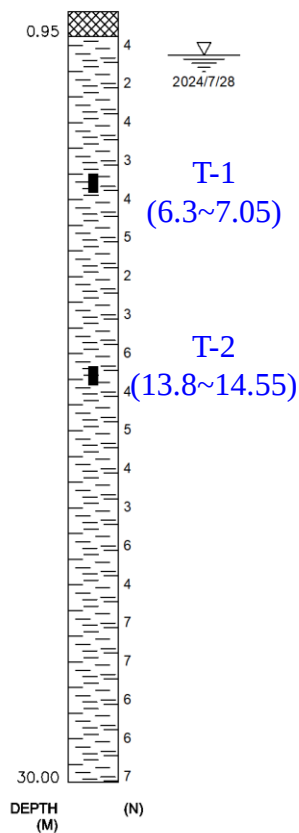
(北投區)

113-TP01



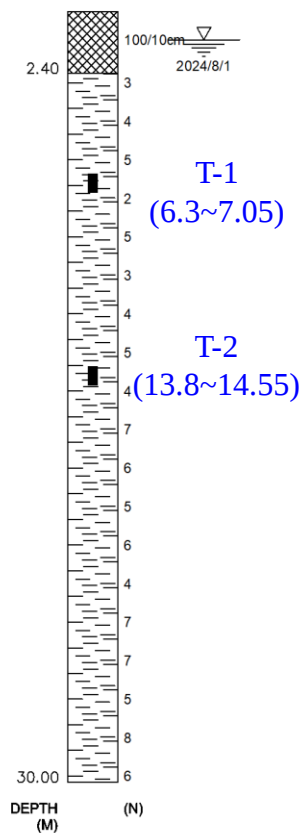
(北投區)

113-TP02



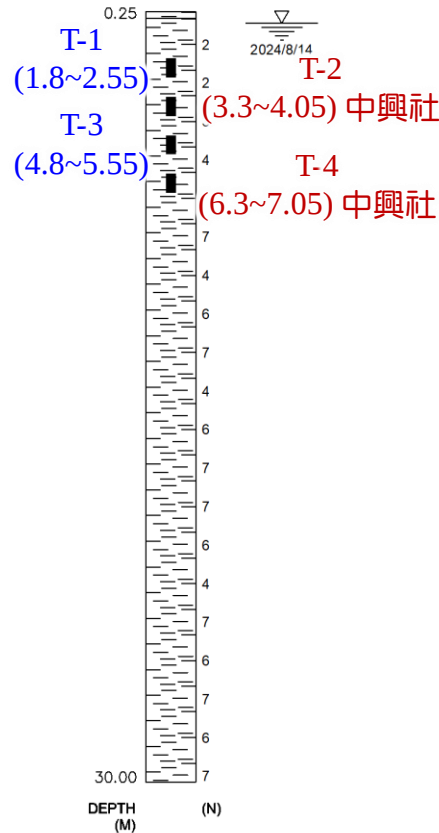
(中山區)

113-TP03



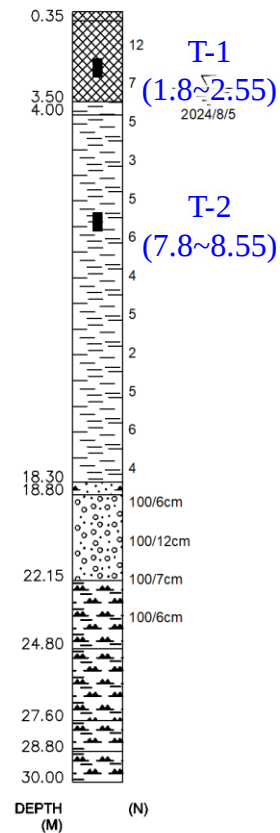
(松山區)

113-TP04



(信義區)

113-TP05



低塑性黏土動三軸試驗成果

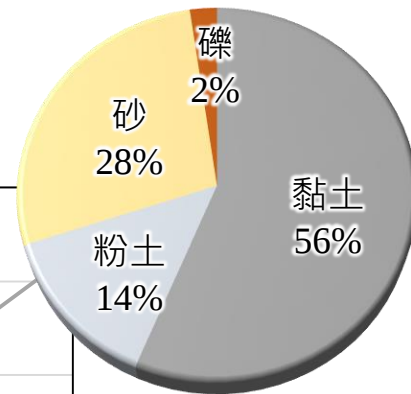
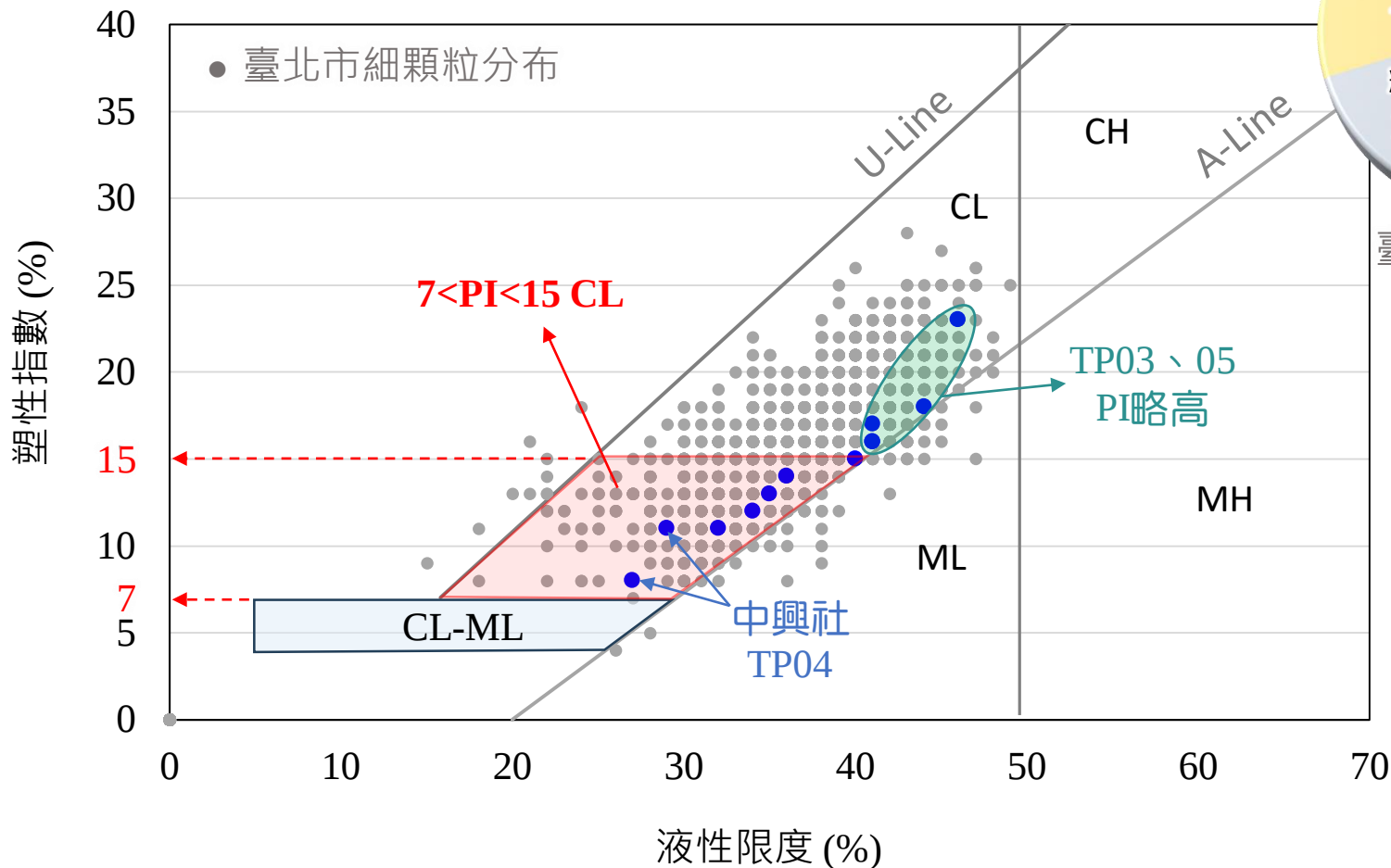
3

動三軸土壤試體物性

No	鑽孔編號	試體深度 (m)	鄰近 N值	試體統一 土壤分類	細顆粒 (%)	含水量 (%)	液性限度 (%)	塑性指數 (%)	Wc/LL	壓密應力 (kPa)
1	113-TP01	4.8~5.55	2	CL	85	42.7	41	17	1.04	55
2	113-TP01	12.3~13.05	2	CL	99	38.0	40	15	0.95	130
3	113-TP02	6.3~7.05	3	CL	98	39.1	32	11	1.22	70
4	113-TP02	13.8~14.55	5	CL	100	36.3	35	13	1.04	145
5	113-TP03	6.3~7.05	3	CL	100	30.1	41	16	0.73	70
6	113-TP03	13.8~14.55	4	CL	100	36.2	44	18	0.82	145
7	113-TP04	1.8~2.55	2	CL	96	29.6	34	12	0.87	20
8	113-TP04	3.3~4.05	2	CL	86	30.2	27	8	1.12	20
9	113-TP04	4.8~5.55	3	CL	99	31.3	36	14	0.87	55
10	113-TP04	6.3~7.05	3	CL	96	30.9	29	11	1.06	70
11	113-TP05	1.8~2.55	9	CL	90	26.2	46	23	0.57	25
12	113-TP05	7.8~8.55	5	CL	100	40.5	41	16	0.99	85

低塑性黏土動三軸試驗成果

3 動三軸試驗成果-塑性圖

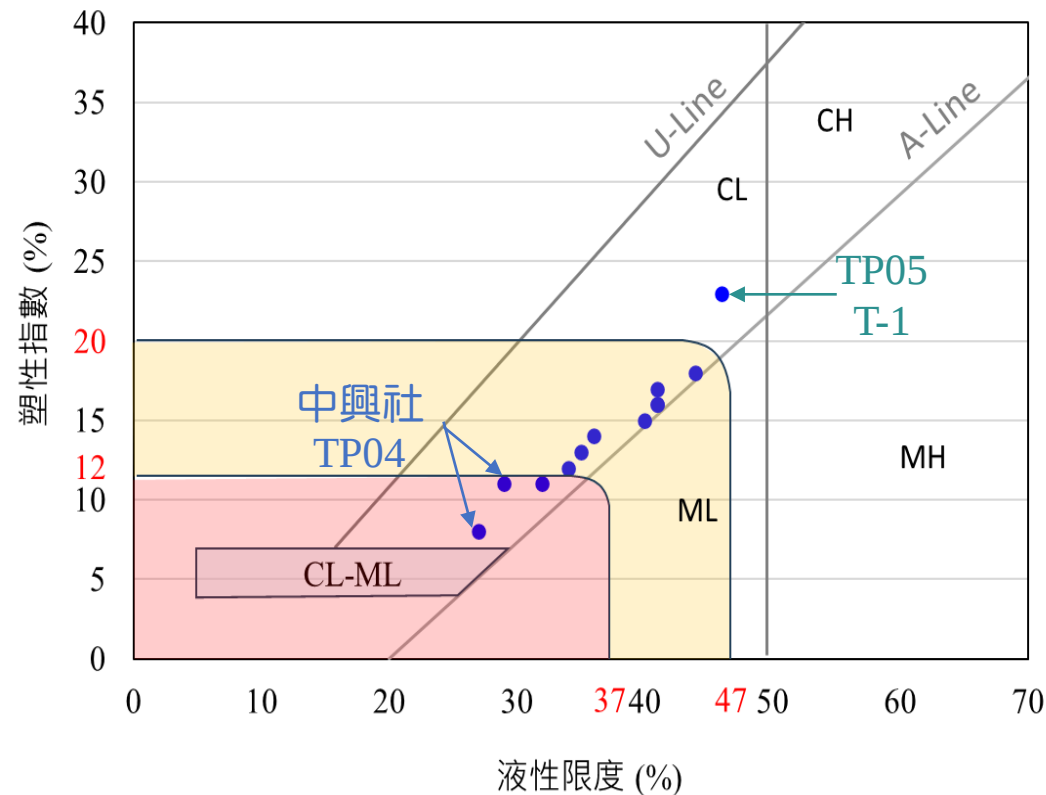


臺北市土層比例

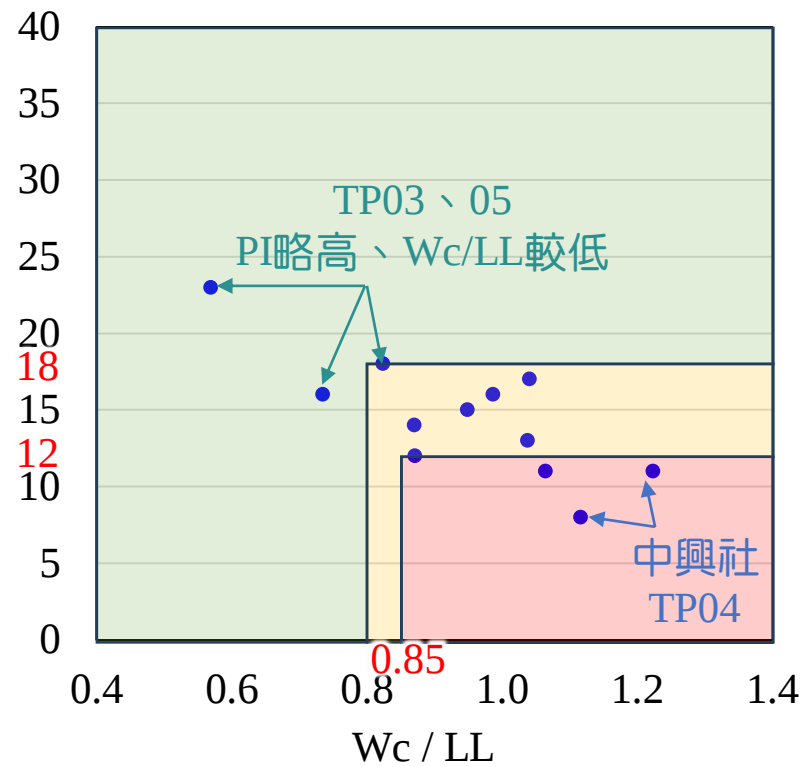
低塑性黏土動三軸試驗成果

3 動三軸試驗成果-塑性圖

➤ Seed et al. (2003)

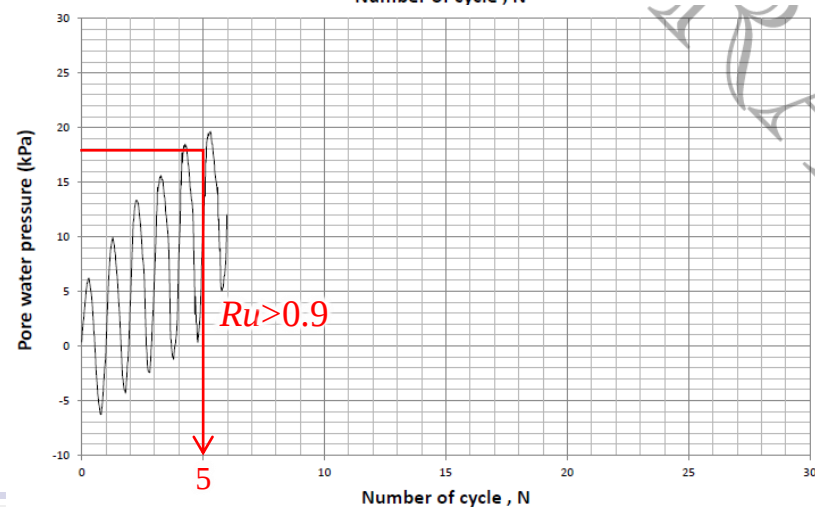
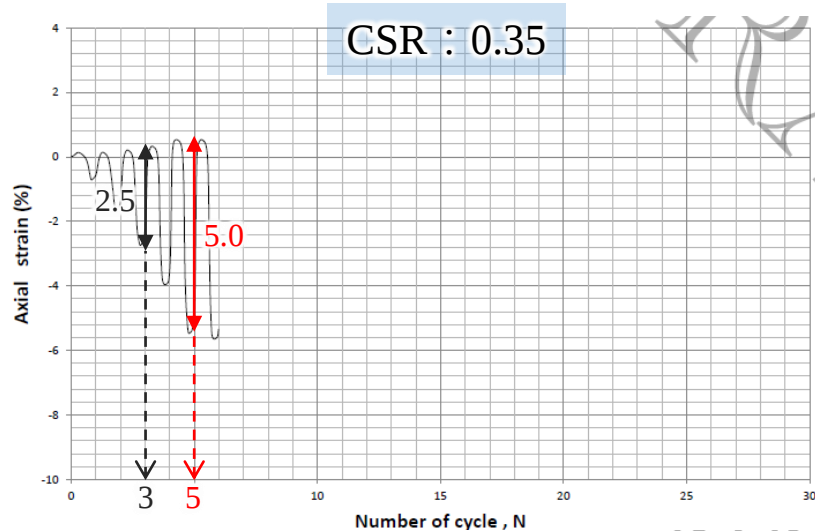
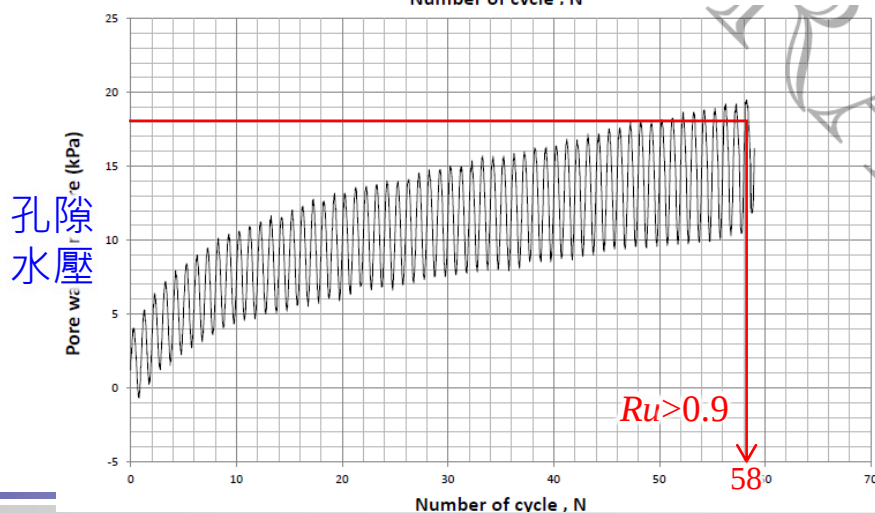
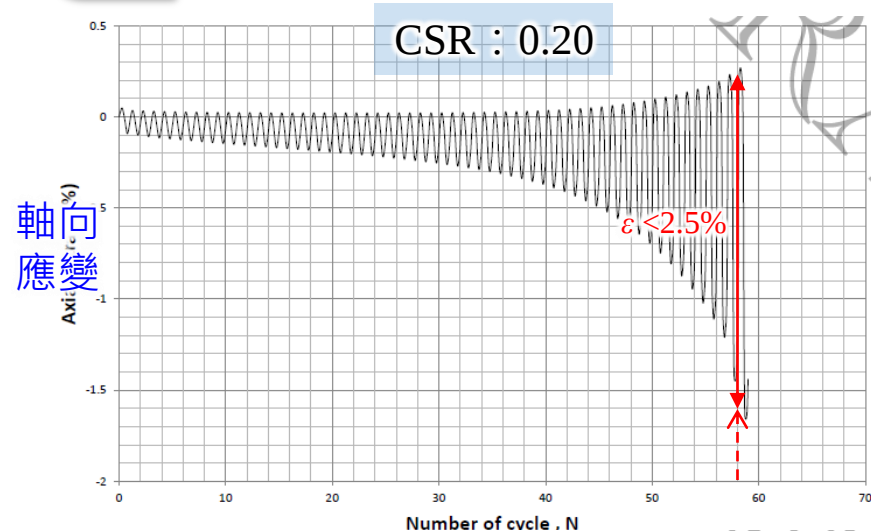


➤ Bray et al. (2006)



低塑性黏土動三軸試驗成果

3 動三軸試驗成果-TP-04-T-2:壓密應力 20kpa、PI=8

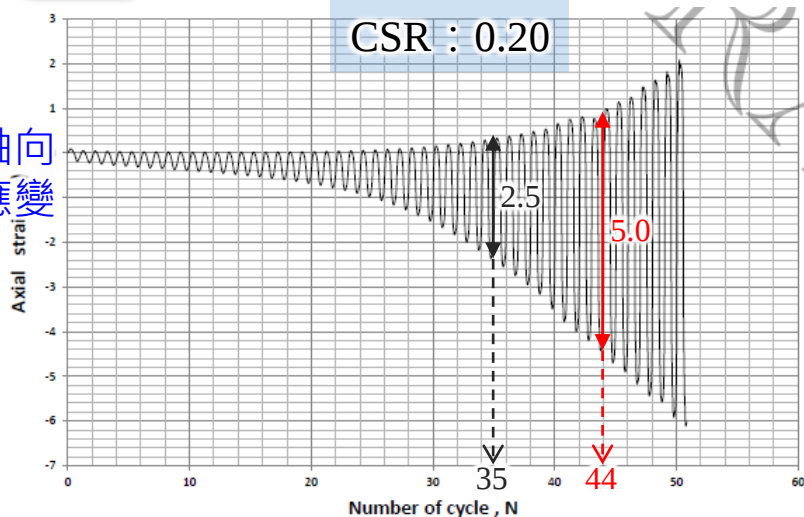


低塑性黏土動三軸試驗成果

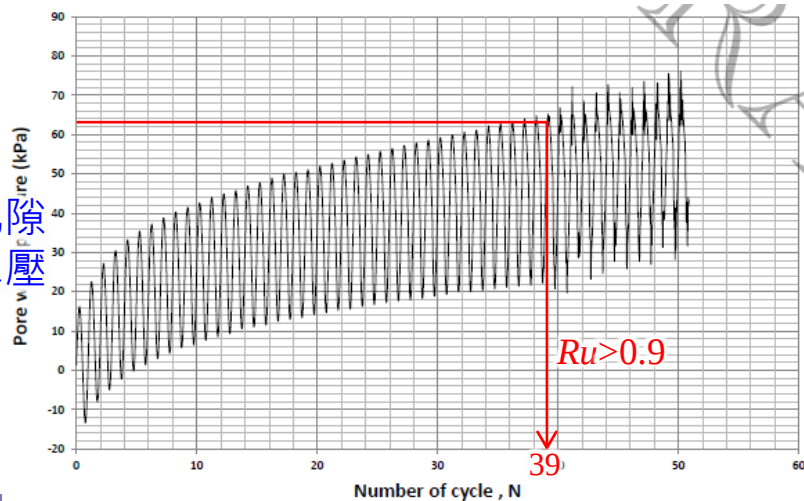
3 動三軸試驗成果-TP-04-T-4:壓密應力 70kPa、PI=11

軸向
應變

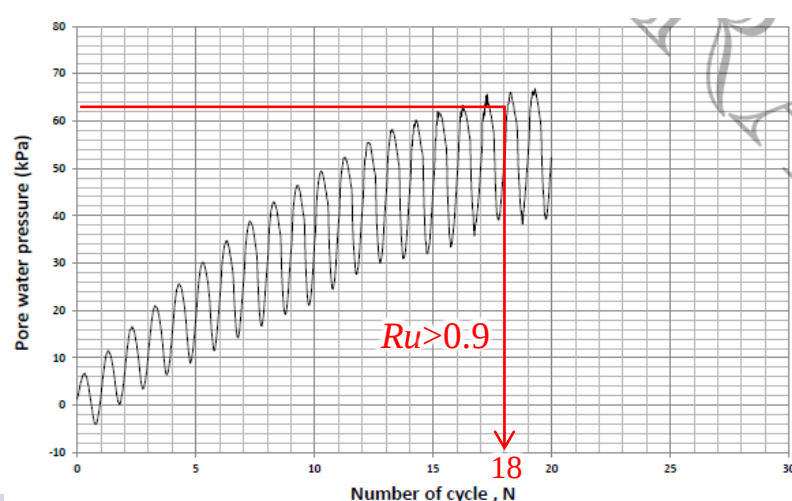
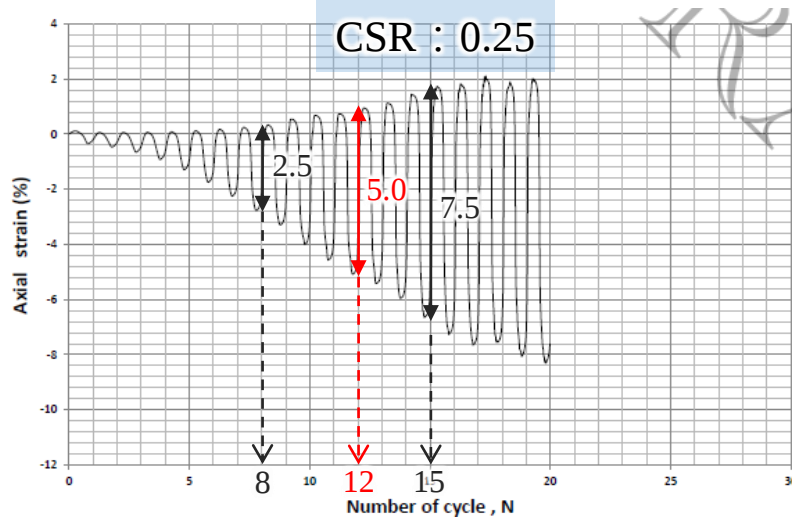
CSR : 0.20



孔隙
水壓



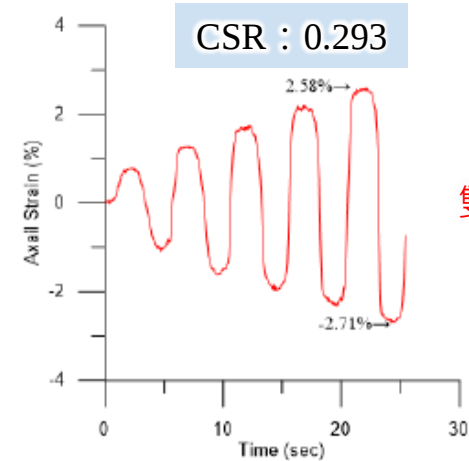
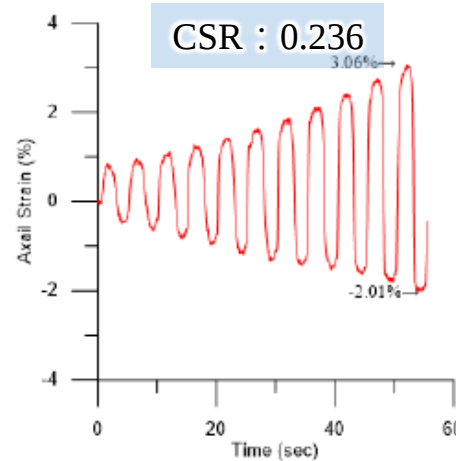
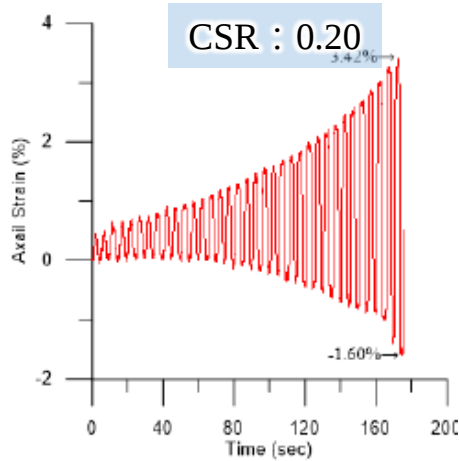
CSR : 0.25



低塑性黏土動三軸試驗成果

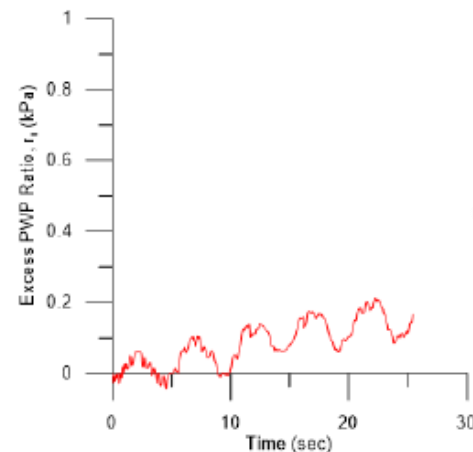
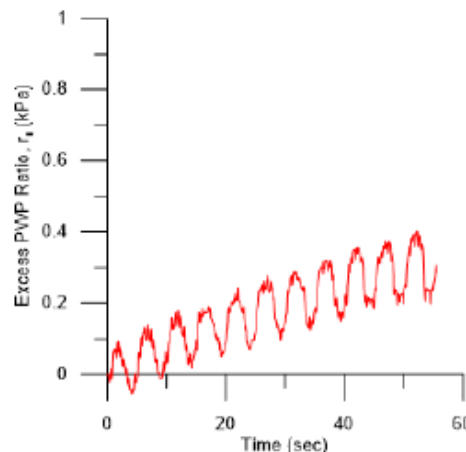
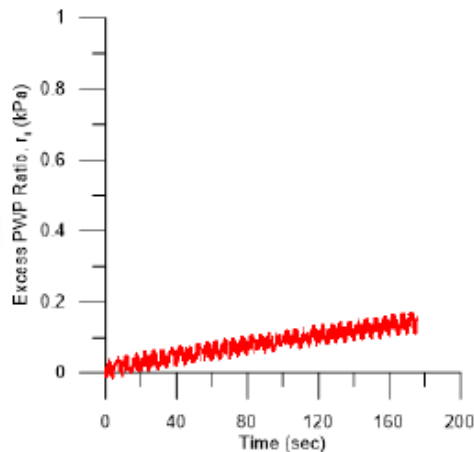
3 動三軸試驗成果-TP-02-T-1:壓密應力 70kpa、PI=11

軸向
應變



雙軸應變>5%

孔隙
水壓比

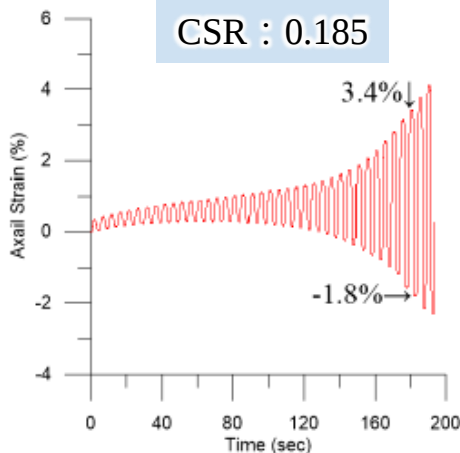


$R_u = 0.1 \sim 0.4$

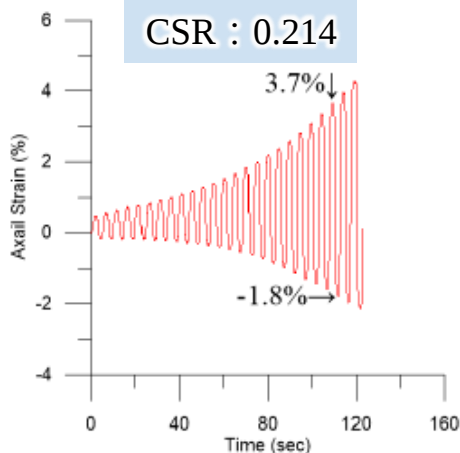
低塑性黏土動三軸試驗成果

3 動三軸試驗成果-TP-02-T-2:壓密應力145kpa、PI=13

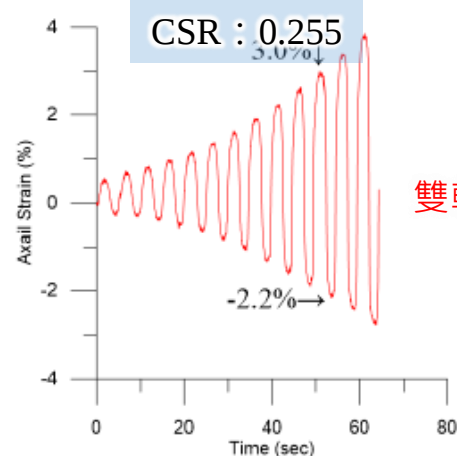
軸向
應變



(b) 軸向應變歷時



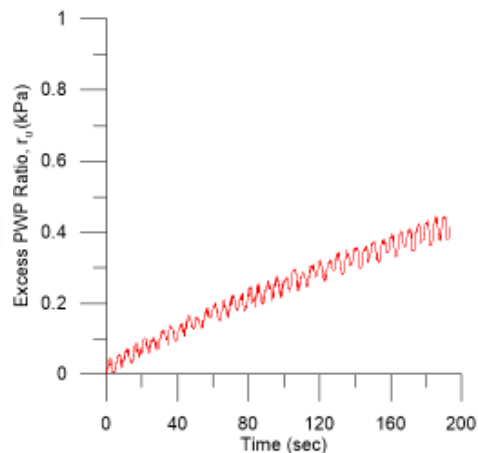
(b) 軸向應變歷時



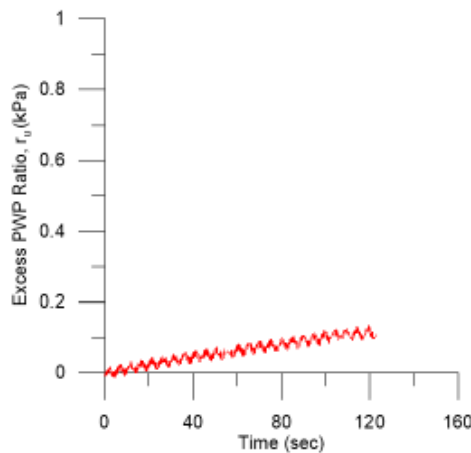
(b) 軸向應變歷時

雙軸應變>5%

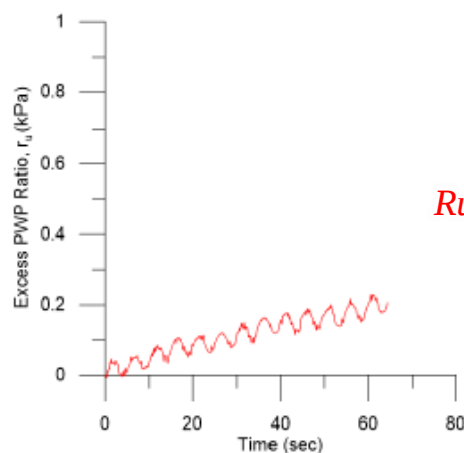
孔隙
水壓比



(d) 超額孔隙水壓比歷時



(d) 超額孔隙水壓比歷時



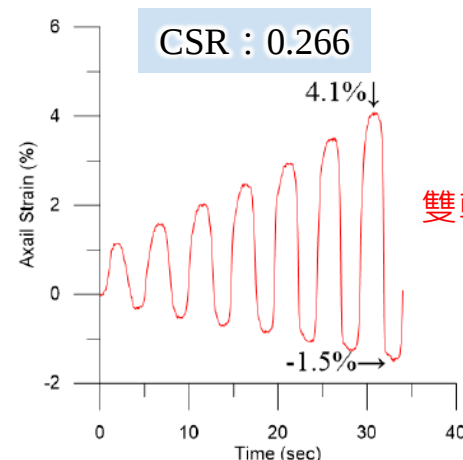
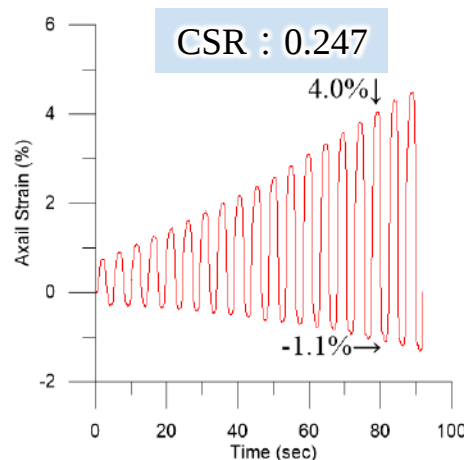
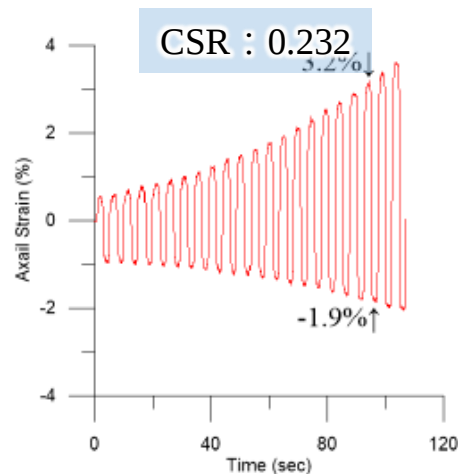
(d) 超額孔隙水壓比歷時

$R_u = 0.1 \sim 0.4$

低塑性黏土動三軸試驗成果

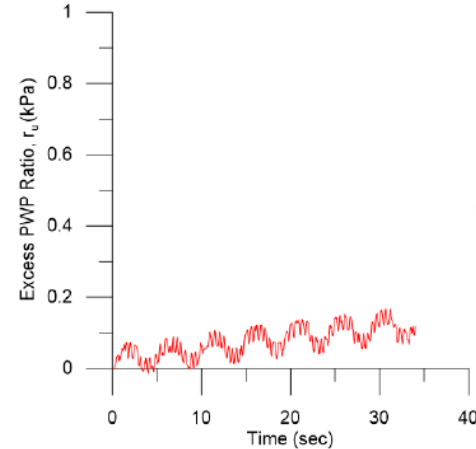
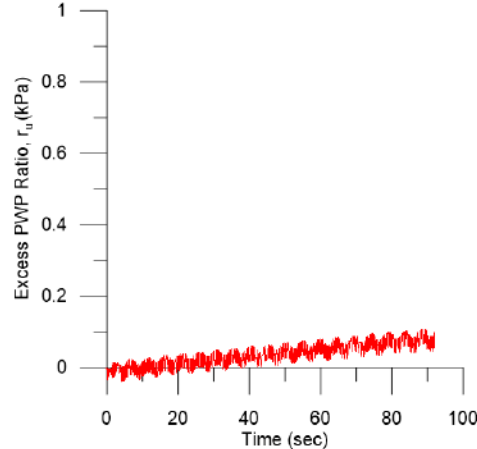
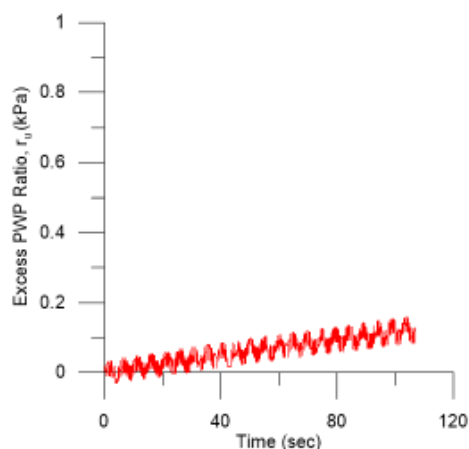
3 動三軸試驗成果-TP-03-T-1:壓密應力 70kpa、PI=16

軸向
應變



雙軸應變>5%

孔隙
水壓比

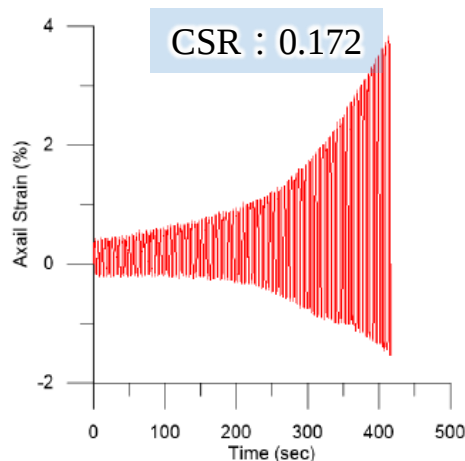


$R_u < 0.2$

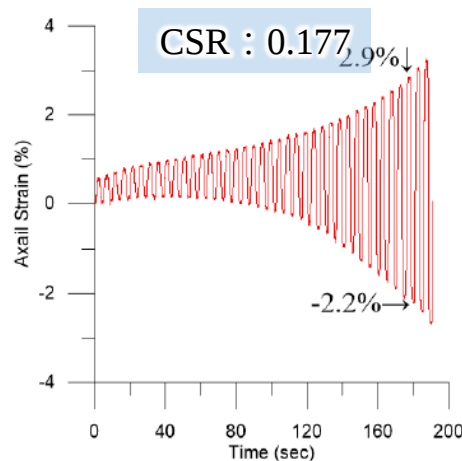
低塑性黏土動三軸試驗成果

3 動三軸試驗成果-TP-03-T-2:壓密應力 145kpa、PI=18

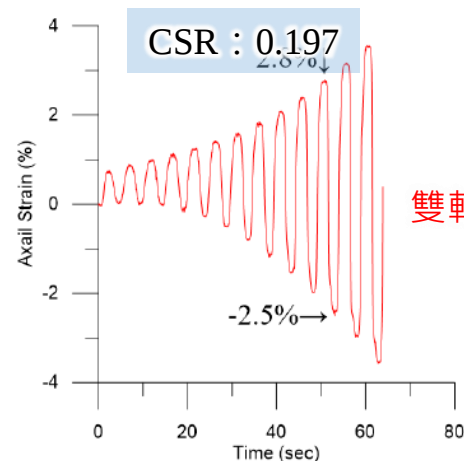
軸向
應變



(b) 軸向應變歷時



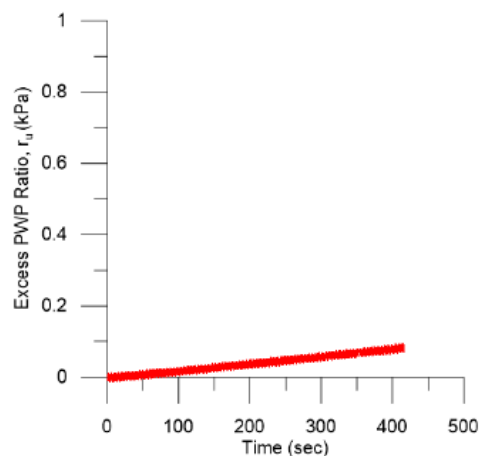
(b) 軸向應變歷時



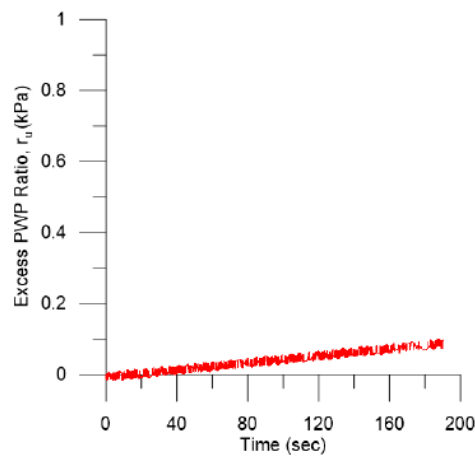
(b) 軸向應變歷時

雙軸應變>5%

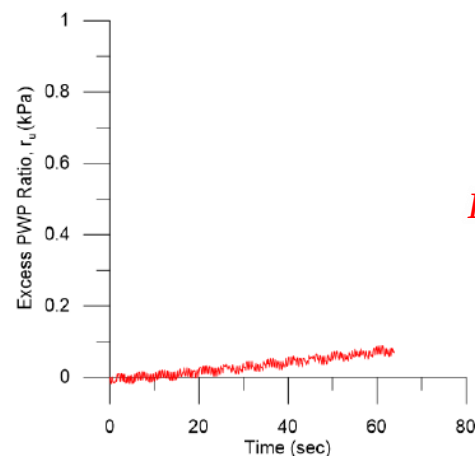
孔隙
水壓比



(d) 超額孔隙水壓比歷時



(d) 超額孔隙水壓比歷時



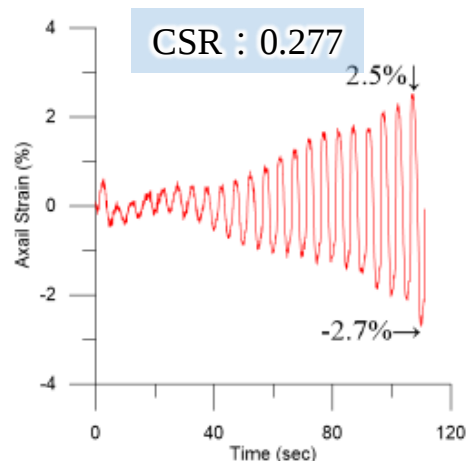
(d) 超額孔隙水壓比歷時

$R_u < 0.2$

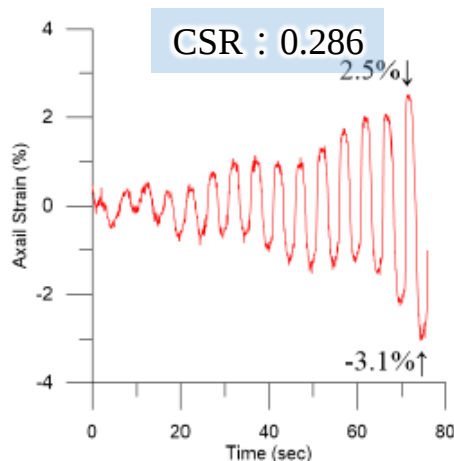
低塑性黏土動三軸試驗成果

3 動三軸試驗成果-TP-04-T-1:壓密應力 20kpa、PI=12

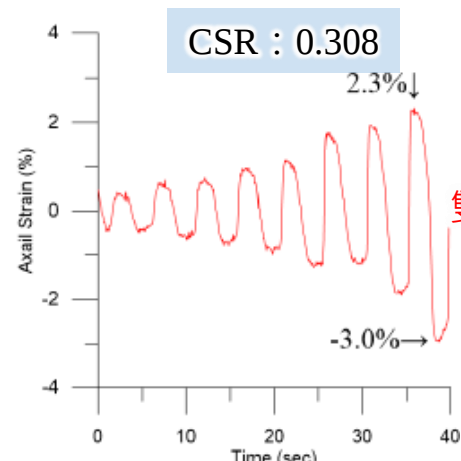
軸向
應變



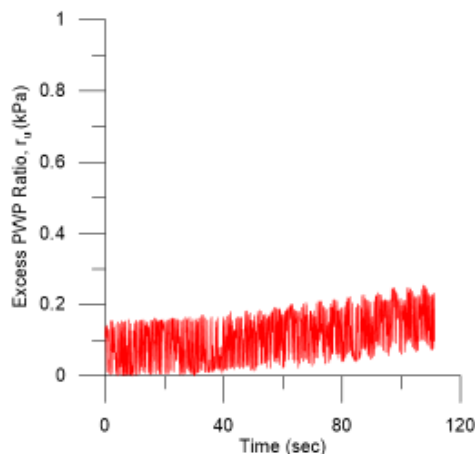
(b) 軸向應變歷時



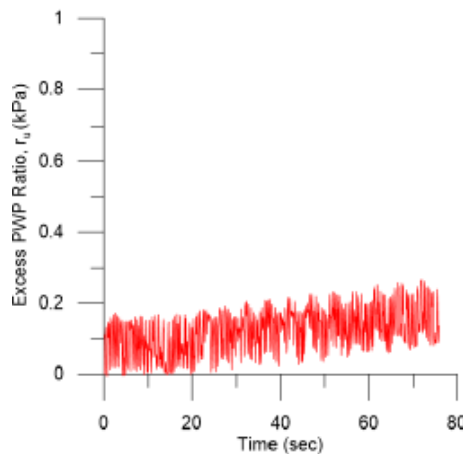
(b) 軸向應變歷時



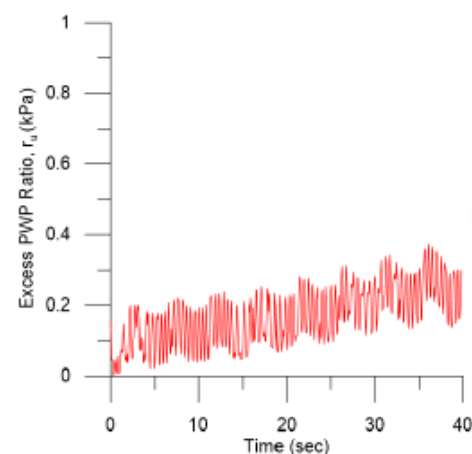
(b) 軸向應變歷時



(d) 超額孔隙水壓比歷時



(d) 超額孔隙水壓比歷時



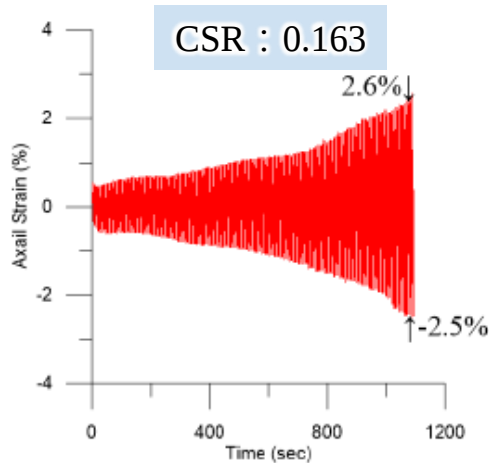
(d) 超額孔隙水壓比歷時

孔隙
水壓比

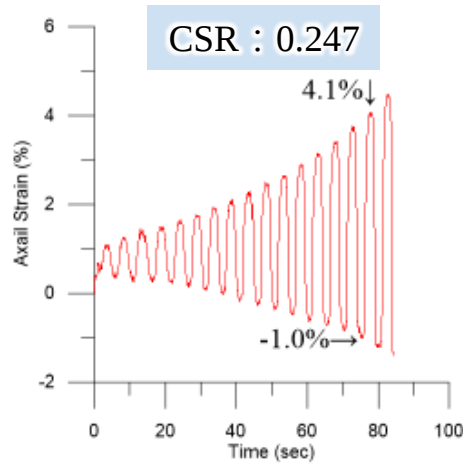
低塑性黏土動三軸試驗成果

3 動三軸試驗成果-TP-05-T-2:壓密應力 85kpa、PI=16

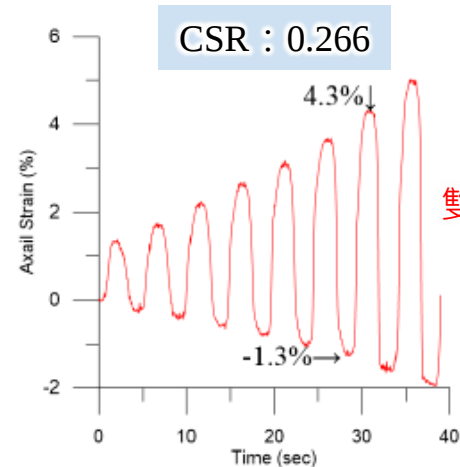
軸向
應變



(b) 軸向應變歷時



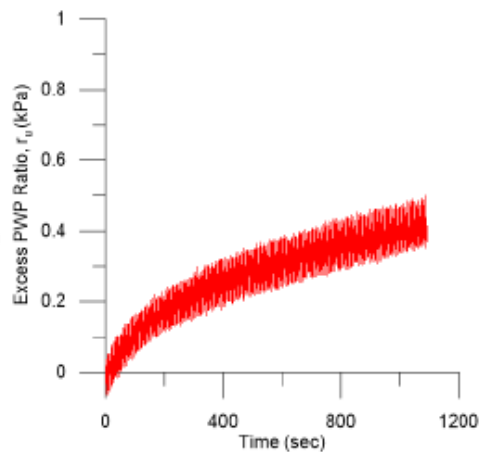
(b) 軸向應變歷時



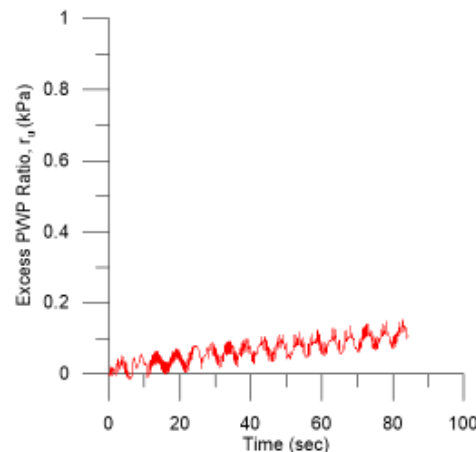
(b) 軸向應變歷時

雙軸應變>5%

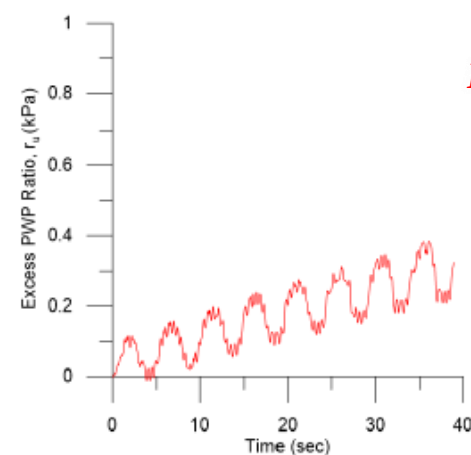
孔隙
水壓比



(d) 超額孔隙水壓比歷時



(d) 超額孔隙水壓比歷時



(d) 超額孔隙水壓比歷時

$R_u = 0.1 \sim 0.5$

低塑性黏土動三軸試驗成果

3

動三軸試驗成果-液化判定基準

鑽孔編號	試體編號	試體深度 (m)	試體統一土壤分類	液性限度 (%)	塑性指數 (%)	試體初始含水量 (%)	壓密應力 (kPa)	反覆剪應力比	液化作用週數	液化判定基準
113-TP02	T-1-1	6.3~7.05	CL	32	11	39.13	70	0.2	35	雙軸向應變大於5%
	T-1-2							0.236	11	雙軸向應變大於5%
	T-1-3							0.293	5	雙軸向應變大於5%
113-TP02	T-2-1	13.8~14.55	CL	35	13	36.33	145	0.185	37	雙軸向應變大於5%
	T-2-2							0.214	23	雙軸向應變大於5%
	T-2-3							0.255	11	雙軸向應變大於5%
113-TP03	T-1-1	6.3~7.05	CL	41	16	30.10	70	0.232	20	雙軸向應變大於5%
	T-1-2							0.247	17	雙軸向應變大於5%
	T-1-3							0.266	7	雙軸向應變大於5%
113-TP03	T-2-1	13.8~14.55	CL	44	18	36.24	145	0.172	152	雙軸向應變大於5%
	T-2-2							0.177	31	雙軸向應變大於5%
	T-2-3							0.197	11	雙軸向應變大於5%
113-TP04	T-1-1	1.8~2.55	CL	34	12	29.61	20	0.277	29	雙軸向應變大於5%
	T-1-2							0.286	15	雙軸向應變大於5%
	T-1-3							0.308	8	雙軸向應變大於5%
113-TP04	T-2-1	3.3~4.05	CL	27	8	31.50	20	0.2	58	初始液化($R_u > 0.9$)
	T-2-2					28.80		0.35	5	$R_u > 0.9$ /雙軸向應變 $> 5\%$
113-TP04	T-4-1	6.3~7.05	CL	29	11	31.30	70	0.2	39	初始液化($R_u > 0.9$)
	T-4-2					30.40		0.25	18	雙軸向應變大於5%
113-TP05	T-2-1	7.8~8.55	CL	41	16	40.46	85	0.163	217	雙軸向應變大於5%
	T-2-2							0.247	16	雙軸向應變大於5%
	T-2-3							0.266	7	雙軸向應變大於5%

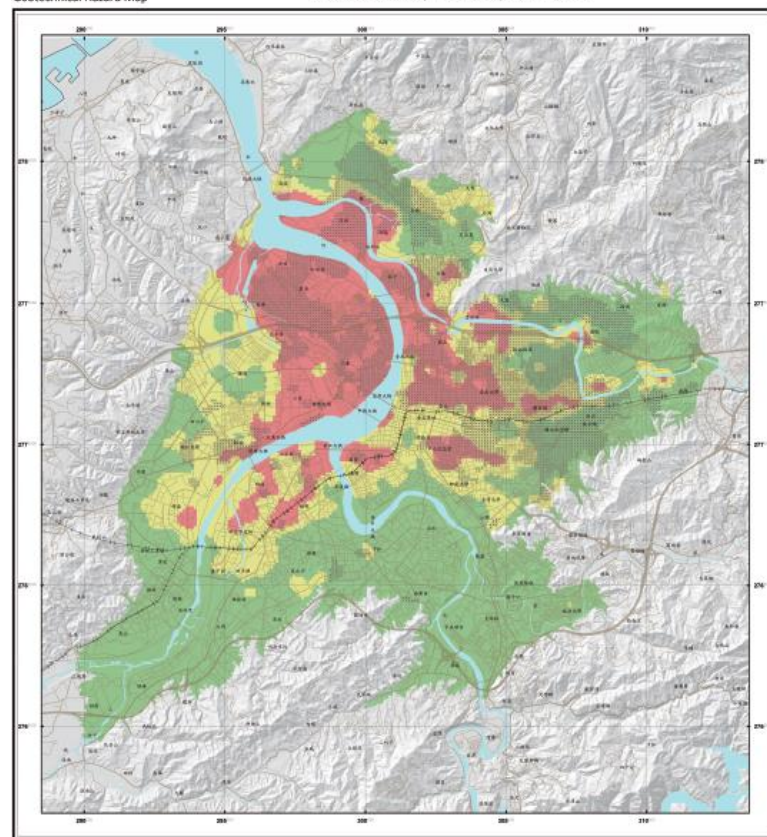
結論

低塑性黏土分析考量範圍

- 低塑性黏土動三軸試驗以應變控制為主 (R_u 大多 < 0.5)，循環荷載下塑性變形累積，其行為屬反覆流動，且黏土層受震軟化現象，與液化不同
- 液化分析高潛勢低塑性黏土時，以 $PI \leq 12$ 、 $W_c/LL \geq 0.85$ 範圍界定

地工災害潛勢圖
Geotechnical Hazard Map

臺北都會區 Taipei Metropolitan Area



土壤液化潛能指數 (PL)
Soil Liquefaction Susceptibility

● 軟弱地盤 (Soft Ground)

PL < 5

$5 \leq PL \leq 15$

PL > 15

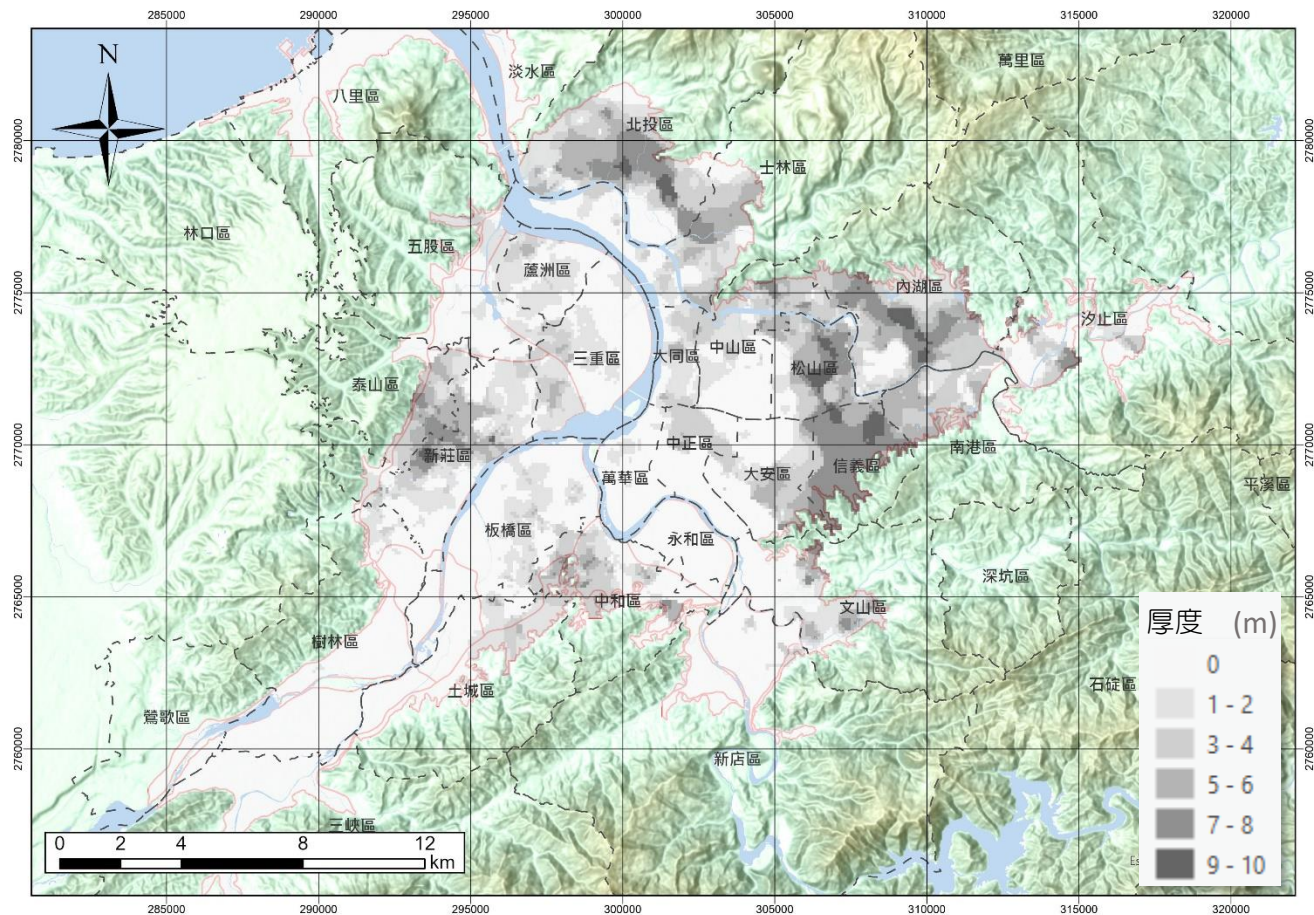
註：以公尺為單位，黏性土層N值小於4為軟弱黏土，砂性土層N值小於10為疏鬆砂土。軟弱地盤為地下20m內之土層，軟弱黏土及疏鬆砂土合計比例超過65%之區域。

(都會區工程環境地質圖集)
(地礦中心, 2020)

結論

軟弱黏土分佈-資料應用

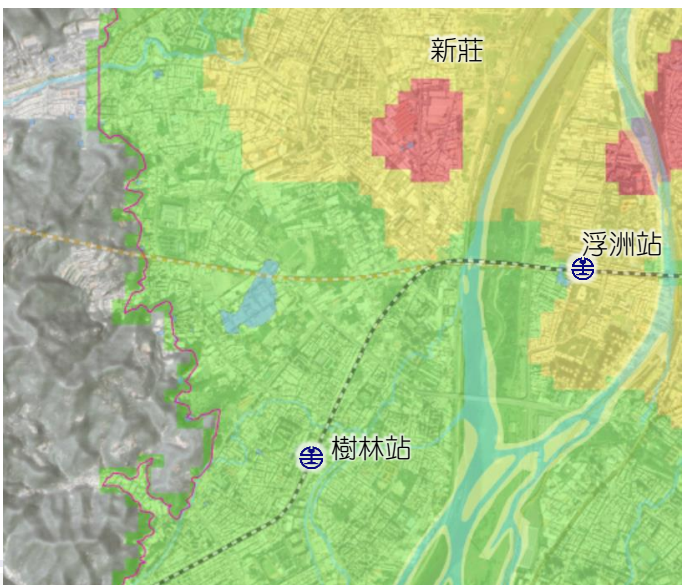
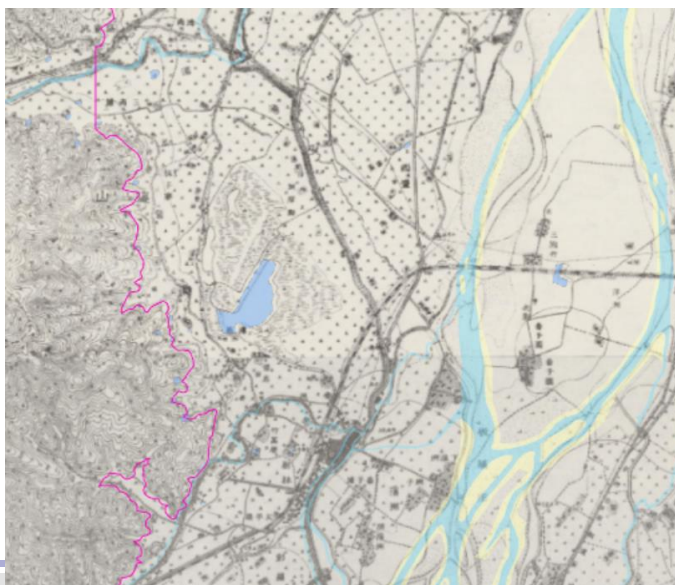
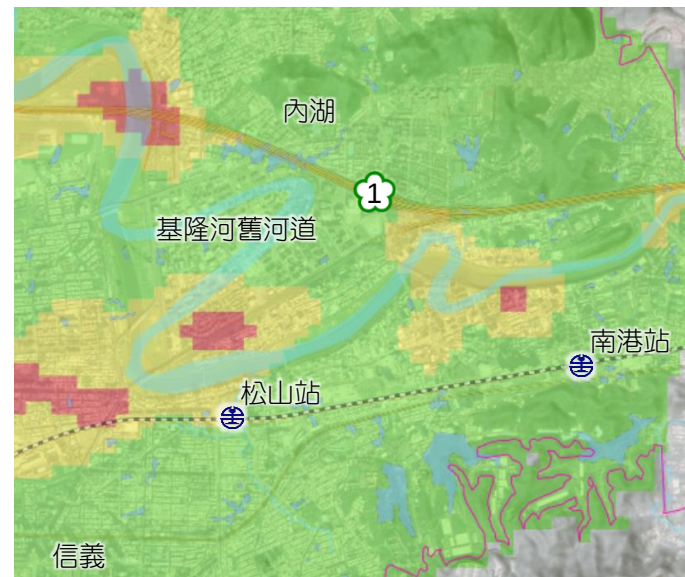
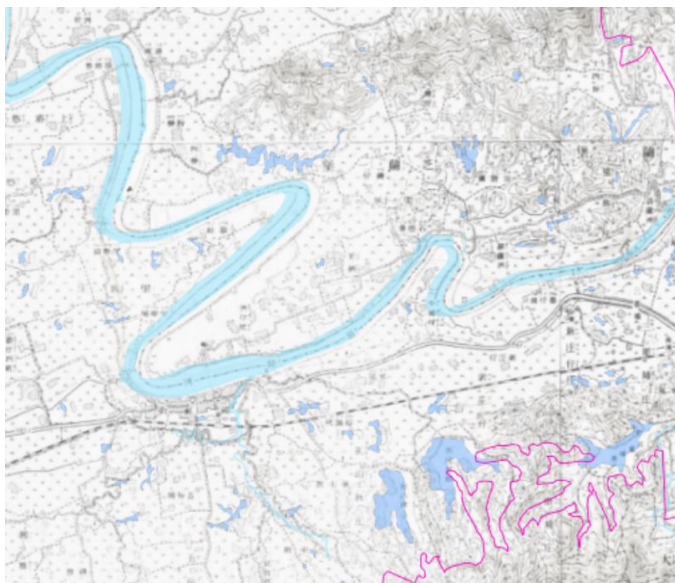
- 於軟弱黏土層開挖最常見之災變模式為土壤隆起
- 地下5、10m、20m軟弱黏土分布
- 信義、松山、內湖、北投、新莊等軟弱黏土厚度超過5m。



結論

古環境圈繪

- 埤塘溼地易沉泥
- 都市更新回填，圖資鑽孔不易調查
- 數化環境資料供參



議題 2

說明4

參考資訊

- 分析鑽孔
- 歷史液化
- 古地圖環境

建議納入後台，點擊時顯示資訊

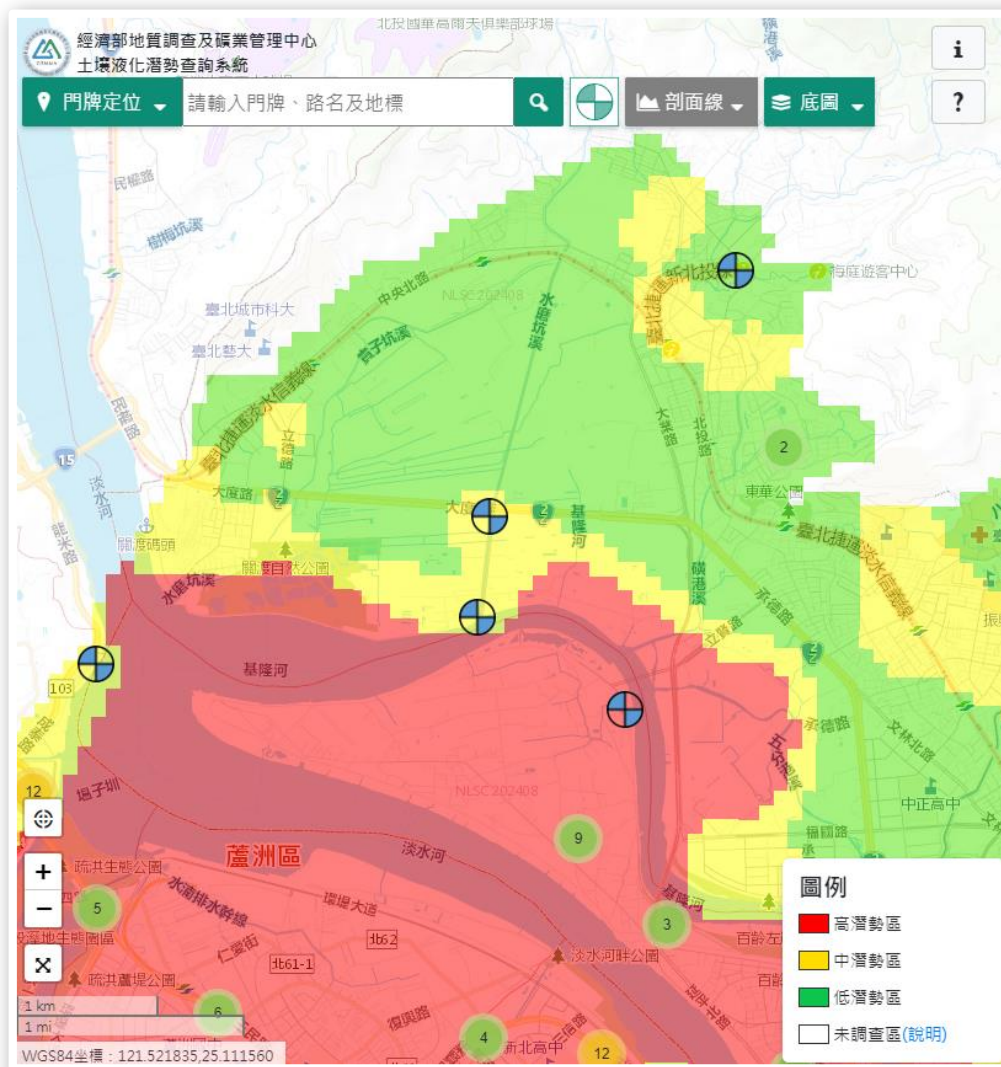
經濟部地質調查及礦業管理中心土壤液化潛勢查詢系統

區位：中潛勢

潛勢圖怎麼看：請您無需恐慌，建議先點選【簡易自我評估】

歷史環境屬【舊河道】

鄰近500m內，存在歷史液化點



感謝與會
敬請指教

低塑性黏土動三軸試驗成果

3

動三軸試驗成果

$$CSR = 0.65 \times \frac{A}{g} \times \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \times r_d$$

$$r_d = \begin{cases} 1.0 - 0.01z & z \leq 10m \\ 1.2 - 0.03z & 10m < z \leq 20m \end{cases}$$

鑽孔編號	試體編號	試體深度 (m)	試體統一土壤分類	塑性指數 (%)	壓密應力 (kPa)	反覆剪應力比	液化作用週數	液化判定基準	15振動週期數之抗液化強度比 $CRR_{7.5}$	CSR (HBF)	$F_L = \frac{CRR}{CSR}$
113-TP02	T-1-1	6.3~7.05	CL	11	70	0.2	35	雙軸向應變大於5%	0.223	0.238	0.98
	T-1-2					0.236	11	雙軸向應變大於5%			
	T-1-3					0.293	5	雙軸向應變大於5%			
113-TP02	T-2-1	13.8~14.55	CL	13	145	0.185	37	雙軸向應變大於5%	0.235	0.231	1.07
	T-2-2					0.214	23	雙軸向應變大於5%			
	T-2-3					0.255	11	雙軸向應變大於5%			
113-TP03	T-1-1	6.3~7.05	CL	16	70	0.232	20	雙軸向應變大於5%	0.245	0.238	1.08
	T-1-2					0.247	17	雙軸向應變大於5%			
	T-1-3					0.266	7	雙軸向應變大於5%			
113-TP03	T-2-1	13.8~14.55	CL	18	145	0.172	152	雙軸向應變大於5%	0.190	0.231	0.86
	T-2-2					0.177	31	雙軸向應變大於5%			
	T-2-3					0.197	11	雙軸向應變大於5%			
113-TP04	T-1-1	1.8~2.55	CL	12	20	0.277	29	雙軸向應變大於5%	0.286	0.160	1.88
	T-1-2					0.286	15	雙軸向應變大於5%			
	T-1-3					0.308	8	雙軸向應變大於5%			
113-TP05	T-2-1	7.8~8.55	CL	16	85	0.163	217	雙軸向應變大於5%	0.243	0.247	1.03
	T-2-2					0.247	16	雙軸向應變大於5%			
	T-2-3					0.266	7	雙軸向應變大於5%			

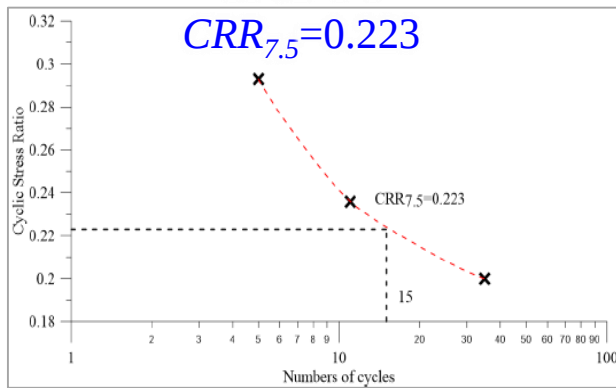
低塑性黏土動三軸試驗成果

3

動三軸試驗成果- $CRR_{7.5}$

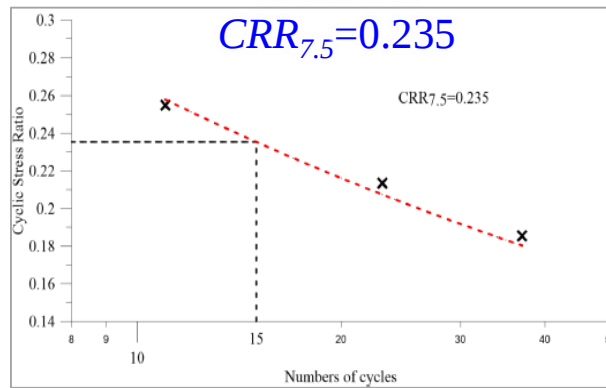
TP02-T-1

$CRR_{7.5}=0.223$



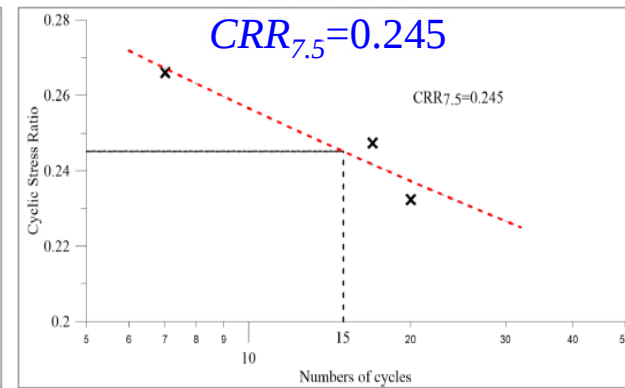
TP02-T-2

$CRR_{7.5}=0.235$



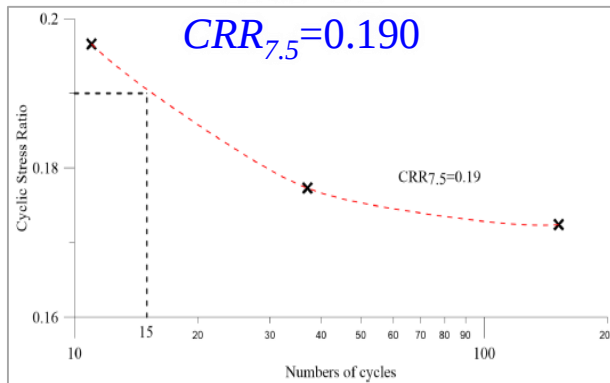
TP03-T-1

$CRR_{7.5}=0.245$



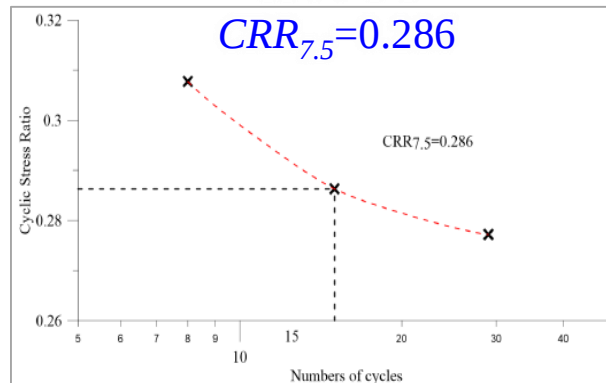
TP03-T-2

$CRR_{7.5}=0.190$



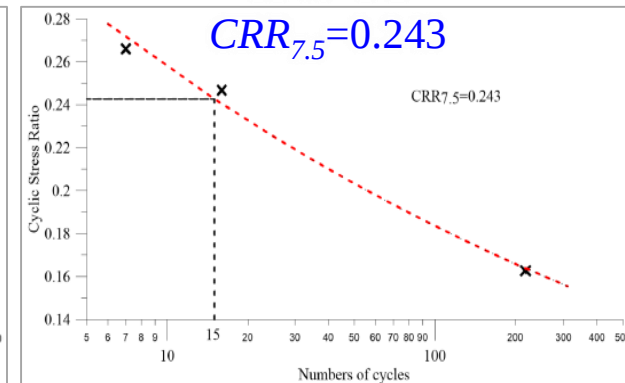
TP04-T-1

$CRR_{7.5}=0.286$



TP05-T-2

$CRR_{7.5}=0.243$



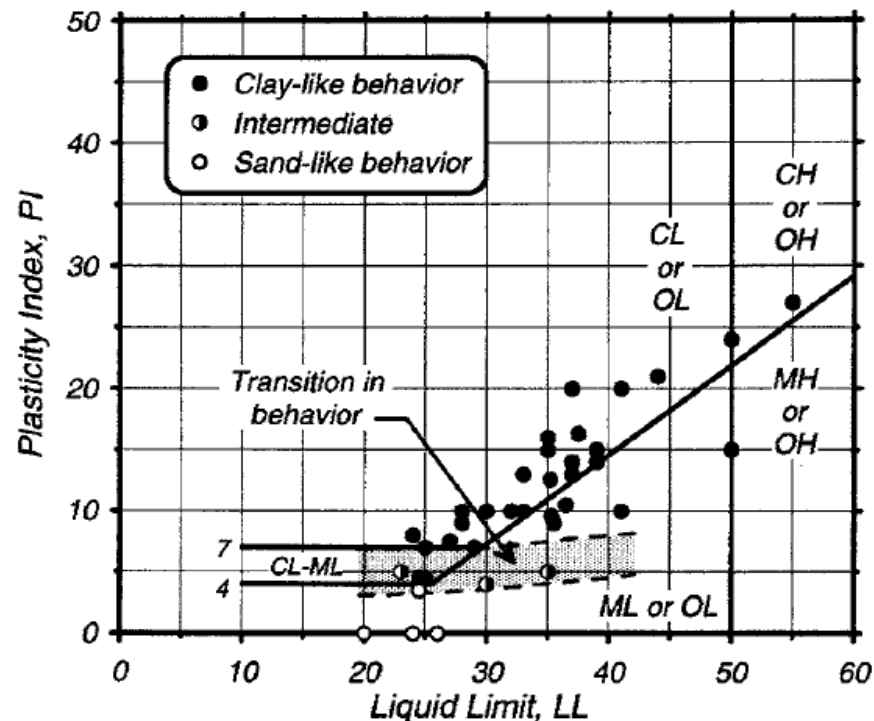
議題 1

說明 I

各分析方法之差異

➤ Boulanger & Idriss (2006、2007)

- $PI < 7$ ：砂土行為，Liquefaction
 - $PI \geq 7$ ：黏土行為，Cyclic Mobility
- • 不排水剪力強度 S_u



$$CRR_M = C_{2D} \left(\frac{\tau_{cyc}}{s_u} \right)_{M=7.5 \sigma'_{vc}} \frac{s_u}{\sigma'_{vc}} MSF K_\alpha$$

$$CSR_M = r_e \frac{\tau_{peak}}{\sigma'_{vc}}$$

議題 1

說明2

低塑性黏土受震行為

$$R_u = \frac{x}{Y} \geq 0.9 \text{ 視為液化}$$

1. 孔隙水壓力反應

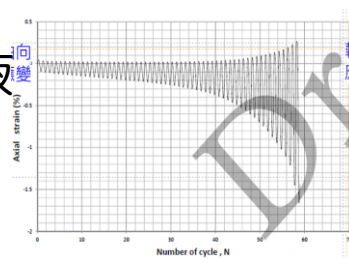
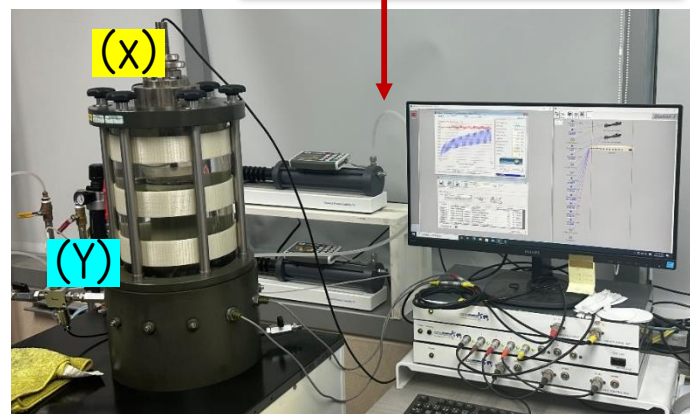
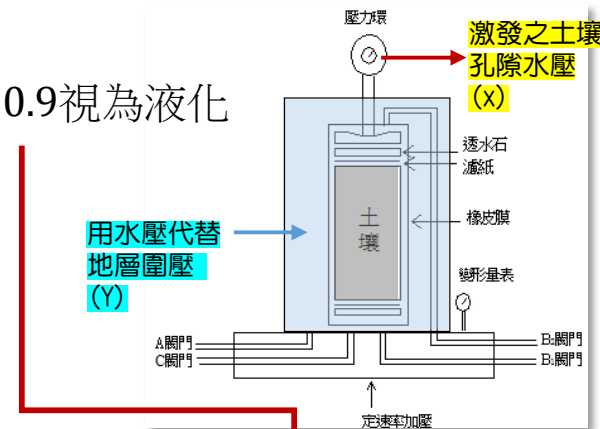
• **砂土**: 鬆散砂土在循環荷載作用下容易積累孔隙水壓力。隨著孔隙水壓力的增加，有效應力減少，最終可能導致液化。

• **黏土**: 相比之下，黏土由於其塑性和黏性，孔隙水壓力的積累通常較慢。黏土中，孔隙水壓力的反應取決於其黏性和剪切模量，通常較砂土慢且變化幅度小。

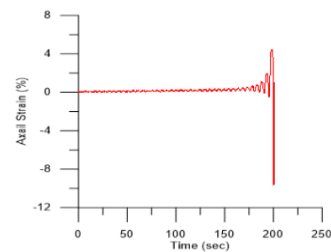
2. 應力-應變行為

• **砂土**: 在液化前，應力-應變曲線往往顯示出應力迅速下降的趨勢，這表明土壤顆粒間的接觸力逐漸消失。

• **黏土**: 黏土在相似的條件下，由於其強度較高且應變較小，應力-應變曲線通常較為平緩。黏土不易發生液化，但在循環荷載下可能出現塑性累積變形，這會導致反覆流動（cyclic mobility）。



黏土



砂土

議題 1

說明3

低塑性黏土動三軸試驗成果

$$CSR = r_d \frac{A}{g} \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}}$$

$$r_d = 1 - 0.015z$$

鑽孔編號	試體深度 (m)	塑性指數 (%)	15振動週期數之抗液化強度比 $CRR_{7.5}$	CRR7.5 (HBF)	CRR7.5 (JRA)	CSR (HBF)	CSR (JRA)	F_L (動三HBF)	F_L (動三JRA)	F_L (簡評HBF)	F_L (簡評JRA)
113-TP02	6.3~7.05	11	0.223	0.110	0.332	0.238	0.354	0.98	0.63	0.49	0.94
113-TP02	13.8~14.55	13	0.235	0.112	0.338	0.231	0.361	1.07	0.65	0.51	0.94
113-TP03	6.3~7.05	16	0.245	0.110	0.339	0.238	0.354	1.08	0.69	0.49	0.96
113-TP03	13.8~14.55	18	0.190	0.108	0.313	0.231	0.361	0.86	0.53	0.49	0.86
113-TP04	1.8~2.55	12	0.286	0.103	0.283	0.160	0.243	1.88	1.18	0.68	1.16
113-TP05	7.8~8.55	16	0.243	0.129	0.774	0.247	0.363	1.03	0.67	0.55	2.13

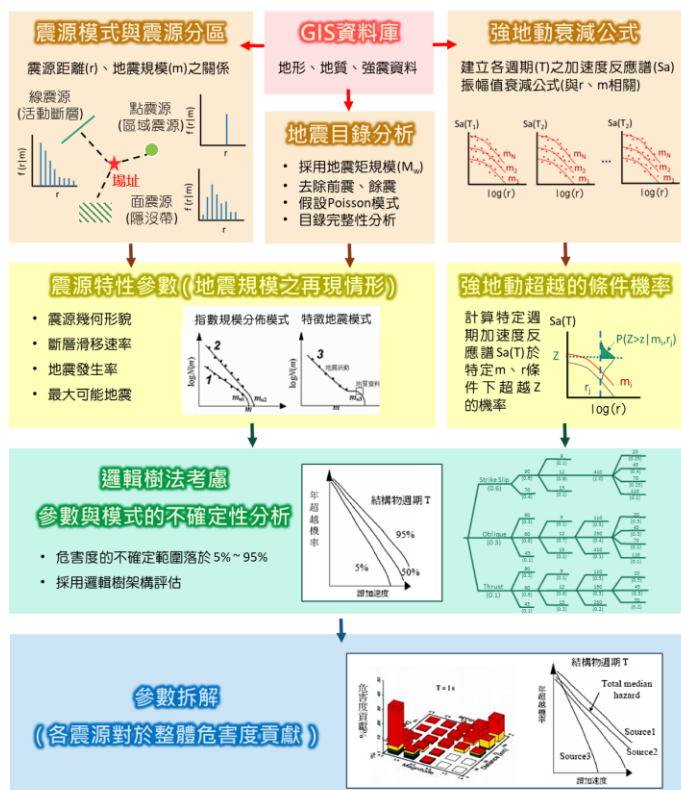
議題 2

說明2

呈圖方式

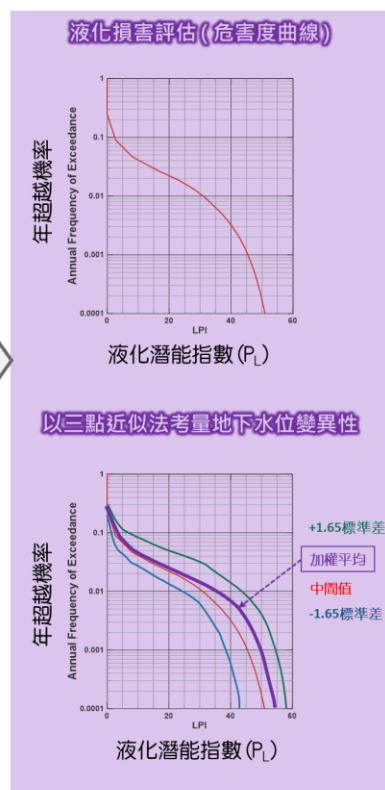
➤ 機率式液化潛勢

機率式地震危害度分析 (PSHA)

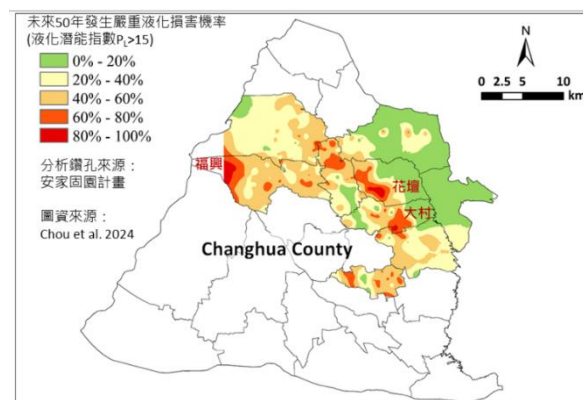
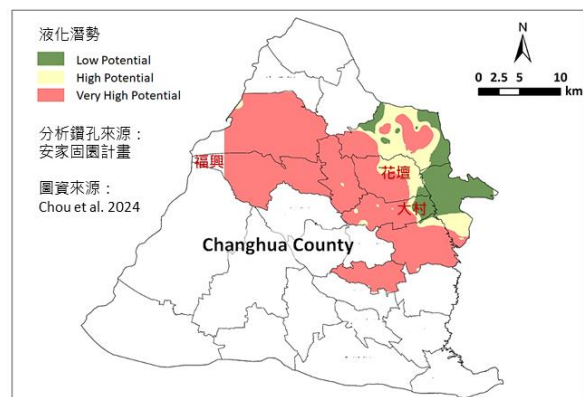


(改自鄭錦桐等人，2009)

液化分析、地下水變動考量



(改自鄭瑞卿等人，2024)

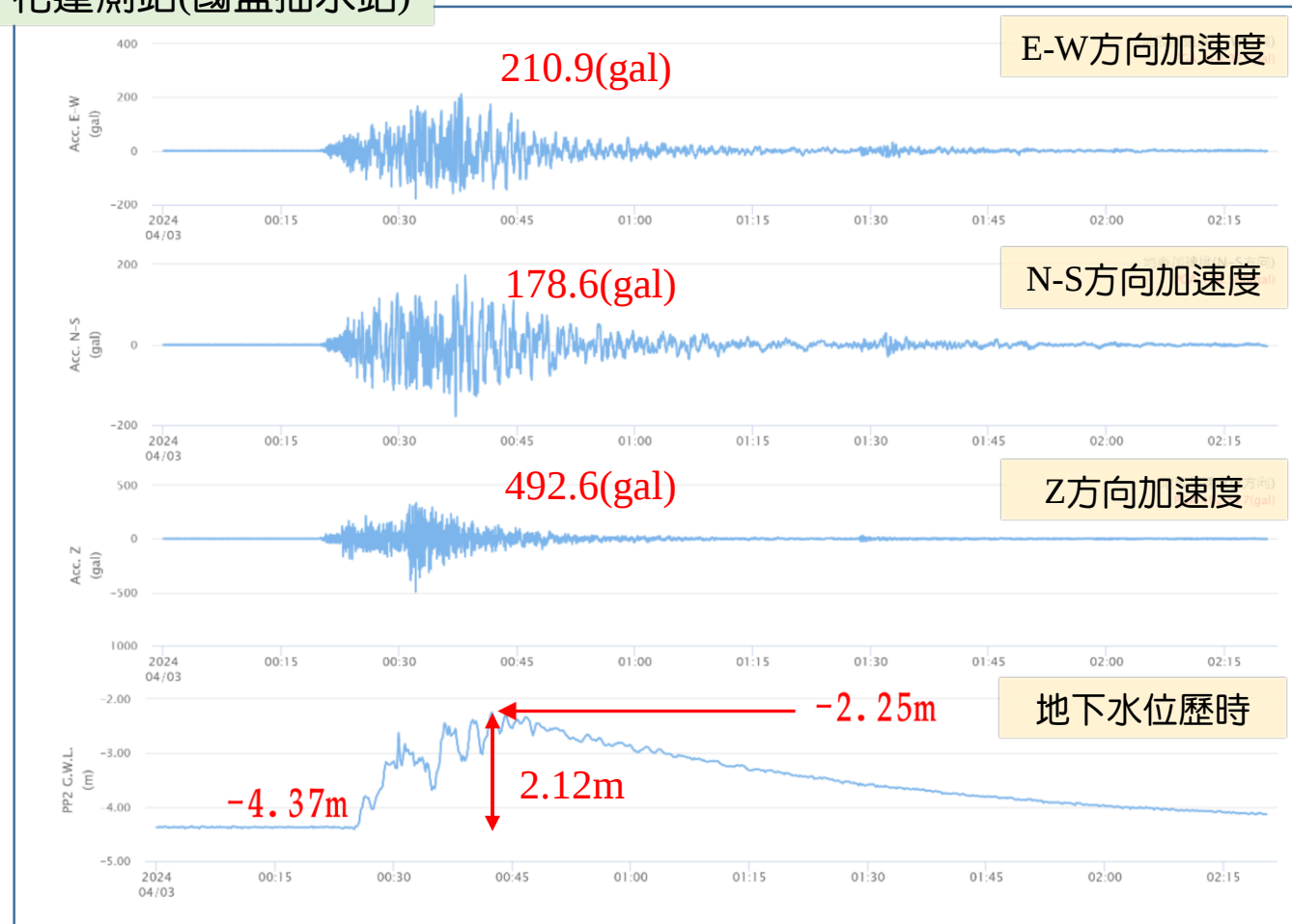


議題 2

● 地震水位-動態監測站量測成果(0403花蓮地震)

- 動態監測站於地震加速度超過8gal時啟動
- 自動加密監測(每秒250次，持續記錄120秒)
- 地下水位抬升約2.12m
- 約於2分鐘內消散

花蓮測站(國盛抽水站)



議題1-低塑性黏土是否應納入土壤液化分析？

1. 從試驗結果看來，低塑性黏土進行動三軸試驗時，超額孔隙水壓雖然有上升趨勢，然而多數試驗結果都先達到塑性破壞，表示震動將使低塑性黏土有軟化的現象。至於 R_u 值範圍從小於0.2到接近0.9都有。請說明本研究本質低塑性、細粒料含量、超額水壓激發關係。
2. 說明水壓試驗成果在不同試驗室有明顯差異之原因。
3. 本研究應先比較各家評估法的土壤抗液化強度。非單獨比較 F_L 和 P_L 。

議題 2-未來圖資分析方法、參數及製圖建議

1. 分析方法-若僅依據現行法規之四種方式進行評估，建議仍採用較廣泛採用的JRA法來進行圖資公告。建築物相關的由營建署負責。
2. 分析參數-地下水位方面，由於土壤液化潛勢地圖為基本圖資，建議採用長期平均水位為主。

其他：

1. 簡報p4提及「黏土由於其塑性和黏性，孔隙水壓力的積累通常較慢」；土壤當中水的流動、阻礙將可能造成孔隙水壓力的蓄積，因此尚須詳細討論土樣滲透係數和液化引致破壞之關聯。
2. 簡報p14針對低塑性黏土動三軸試驗提到「與既有分析法考量之不液化行為不同，建議應不宜混用」；而本研究使用液化判定標準係基於傳統之應力和應變標準，請比較其他判定標準，如黏滯係數標準(Viscous criterion)(Qin et al., 2023)、能量標準(Energetic criterion)判斷(Mele and Flora, 2019; Ko et al., 2024)，以確保適用性，以及運用不同的角度討論土樣破壞的行為。

