

液化

1. 液化

固體狀土因空隙水壓上昇呈液狀，失去對外力的抵抗力稱為土壤**液化**，液化現象有：

① 噴砂、噴水

地盤內產生過剩空隙水壓，順著壓力梯度形成向上的滲透流，將含土的水噴出地表。下圖為 2011 年基督城地震嚴重液化的道路。



摘自：<http://www.flickr.com/photos/23934380@N06/5471846307/>

② 地盤下陷

因地盤內空隙水部份噴出，液化層受壓縮導致地表下降。通常不會呈均勻下陷，致使表地表的結構物產生不均勻下陷。下圖為 2011 年基督城地震因土壤液化致使房屋下陷。



摘自：<http://commons.wikimedia.org/wiki/User:Schwede66>

③ 地盤水平方向的永久位移(側向流動)

隨著地盤液化，地盤失去有效應力呈液態，即使在地表坡度非常緩處亦會向斜坡下方作水平位移。

④ 地盤搖動

地盤內液化層周邊及下方有未液化層存在時，液化層會作宛如容器內液體的搖動。地表鋪面板或埋設於地表附近管線會在液化層邊界附近相互水平碰撞造成損傷。

⑤ 斜坡流動崩壞

斜坡內土壤液化時會形成流動性崩壞，崩塌土砂會到達遠處。

⑥ 降低地盤支撐力

因有效應力降低，地盤支撐力隨之降低。

⑦ 破壞碼頭或擁壁

擋土結構物背後地盤液化，增大水平壓力，致使結構物倒塌，下圖為 1999 年 921 集集地震，台中港碼頭地盤下陷。



摘自：http://www.ncree.org/safehome/ncr02/pc3_2.htm

2011 埃及尼羅河之旅

⑧ 埋設結構物浮升

視比重比周邊地盤飽和密度小的埋設結構物受被液化周邊地盤浮力影響向上浮升。下圖為 2011 日本東北太平洋沖地震浦安市人孔涵管浮升。



摘自：http://www.ntuce-ewsletter.tw/vol.43/T4_1.html

1) 必要檢討液化的設施有：

- ① 耐震強化碼頭
- ② 作為防災據點的港灣設施
- ③ 重要度高的結構物

2) 檢討液化順序如下表所示



2. 液化預測

判別液化流程如下表所示。

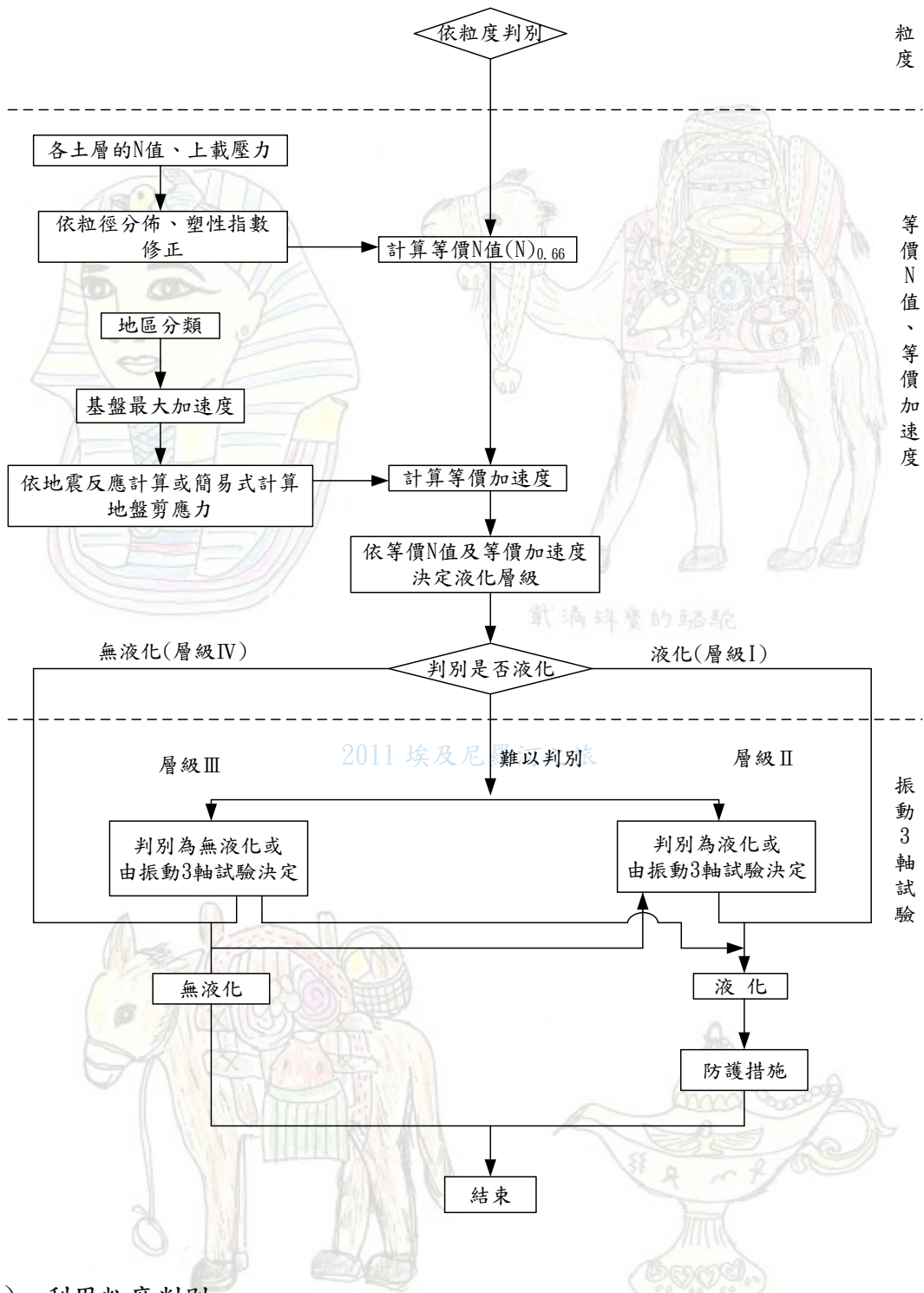
2011 埃及尼羅河之旅



載滿貨品的驢子

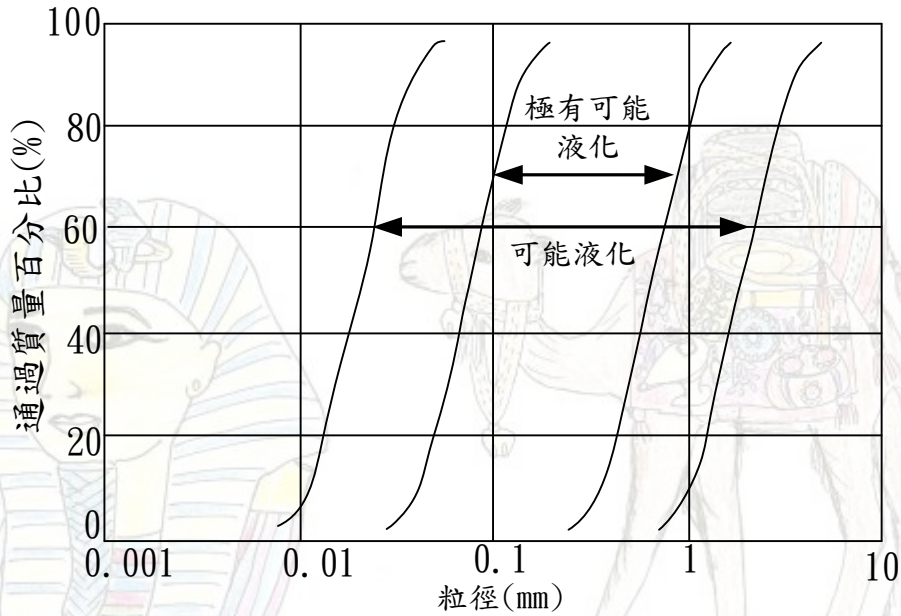


阿拉丁神燈

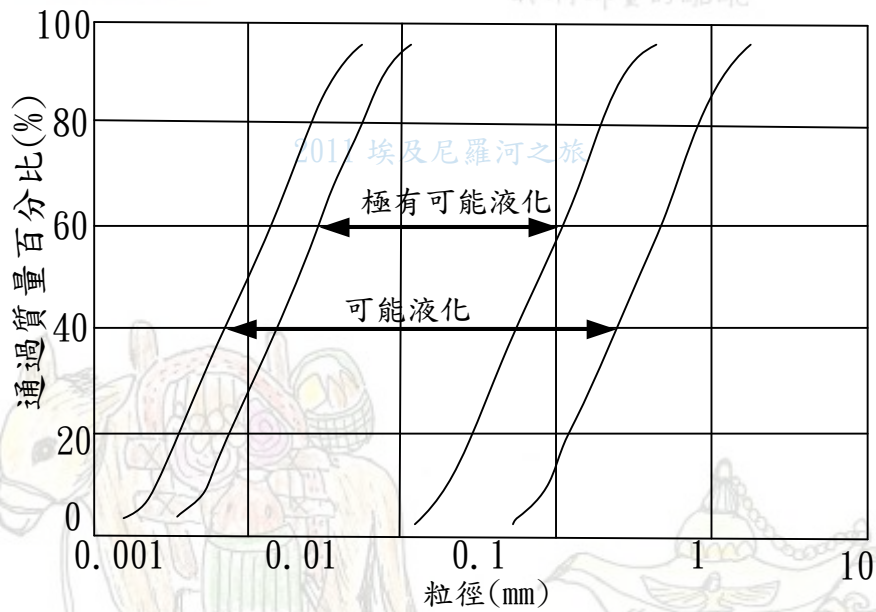


1) 利用粒度判別

利用下圖分類土壤，以平均係數 $U_c = D_{60}/D_{10} = 3.5$ 為界，分別判定。 D_{60} 及 D_{10} 分別表示 60% 及 10% 徑。



(a) 可能液化土壤粒度($U_c < 3.5$)



(b) 可能液化土壤粒度($U_c \geq 3.5$)

圖中「可能液化」以外範圍可視為不會發生液化範圍。粒徑累加曲線橫跨 2 個範圍不容易分類時，對黏土可依後述方法做適當判別。對礫石，透水係數大於 3cm/s 以上時可確定不會發生液化，但是上層為透水性不良粘土層或泥層的土層，則有液化可能性。透水係數小於 3cm/s 者有可能發生液化。測定透水係數有困難時，依粒徑有經驗公式可估算，但是此方法受細料含有率等影響，必須注意其適用性。

2) 利用等價 N 值及等價加速度判別

對依上圖判定為「可能液化」土層，必須利用等價 N 值及等價加速度加以判別。計算對應地盤液化抵抗力的等價 N 值及地震發生時地盤剪應力有關的等價加速度，由 2 者判斷是否會發生液化。

(1) 等價 N 值

等價 N 值為將各土層 N 值，以有效上載壓 64.68kN/m^2 的同一相對密度土層 N 值加以換算者，可依下式表示(對細料比例大者必須作後述修正)。

$$(N)_{0.66} = \frac{N - 0.019(\sigma'_v - 65)}{0.0041(\sigma'_v - 65) + 1} \quad (A)$$

$(N)_{0.66}$: 等價 N 值

N : 土層 N 值

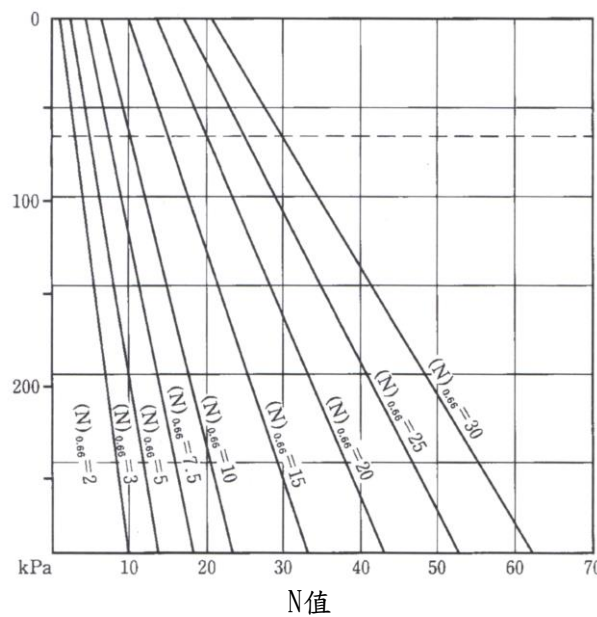
σ'_v : 土層有效上載壓力(kN/m^2)，有效上載壓力依標準貫穿試驗時的地盤高度計算

上式適用範圍為

$$2 \leq (N)_{0.66} \leq 40$$

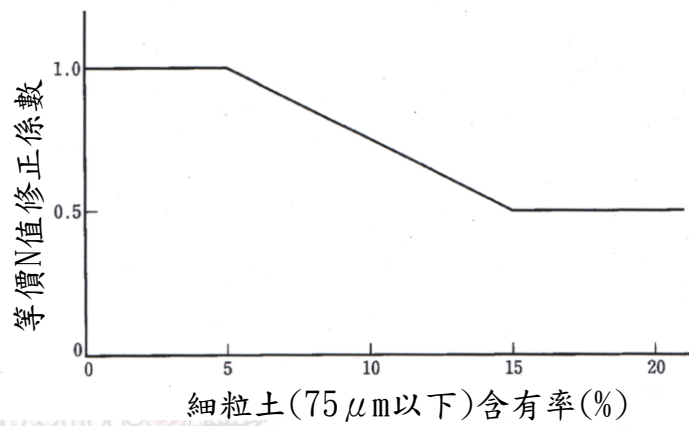
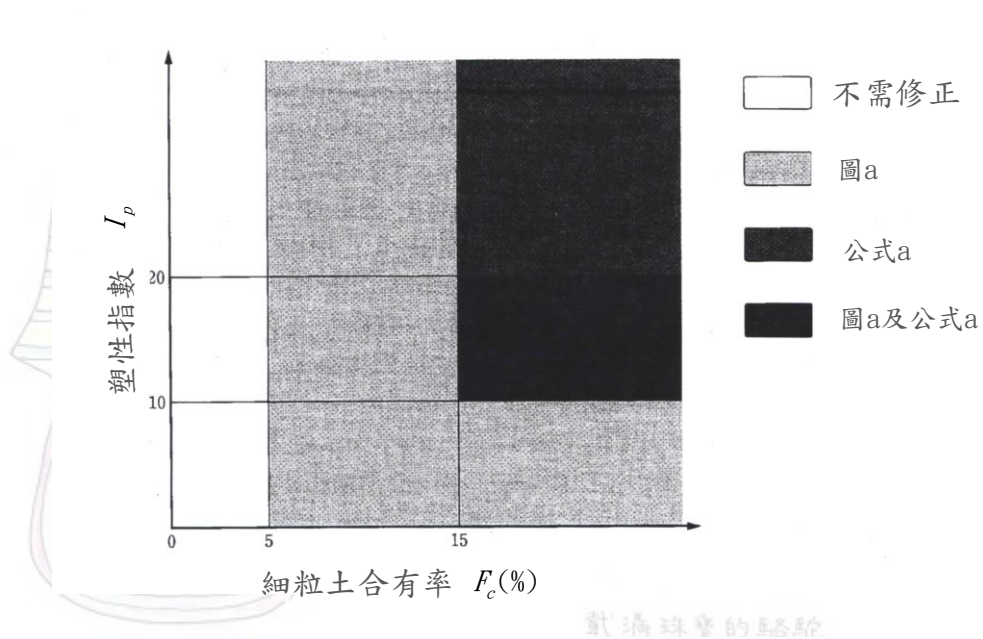
$$0 \leq \sigma'_v \leq 294\text{kN/m}^2$$

(A)式可以下圖表示



等價N值換算表

當細料(粒徑小於 $75\mu\text{m}$)佔 5%以上時必須依下圖作下列修正。



細料含有率等價 N 值修正係數

① 細料含有率未達 15%

將(A)式求得 N 值除以上圖所示修正係數得等價 N 值。

② 細料含有率超過 15%

i. 塑性指數 $I_p < 10$ 或無法取得塑性指數

將(A)式求得 N 值除以上圖所示修正係數得等價 N 值。

ii. 塑性指數 $I_p \geq 20$

依土層取得的 N 值，利用下式修正

$$\Delta N = 8 + 0.4(I_p - 10)$$

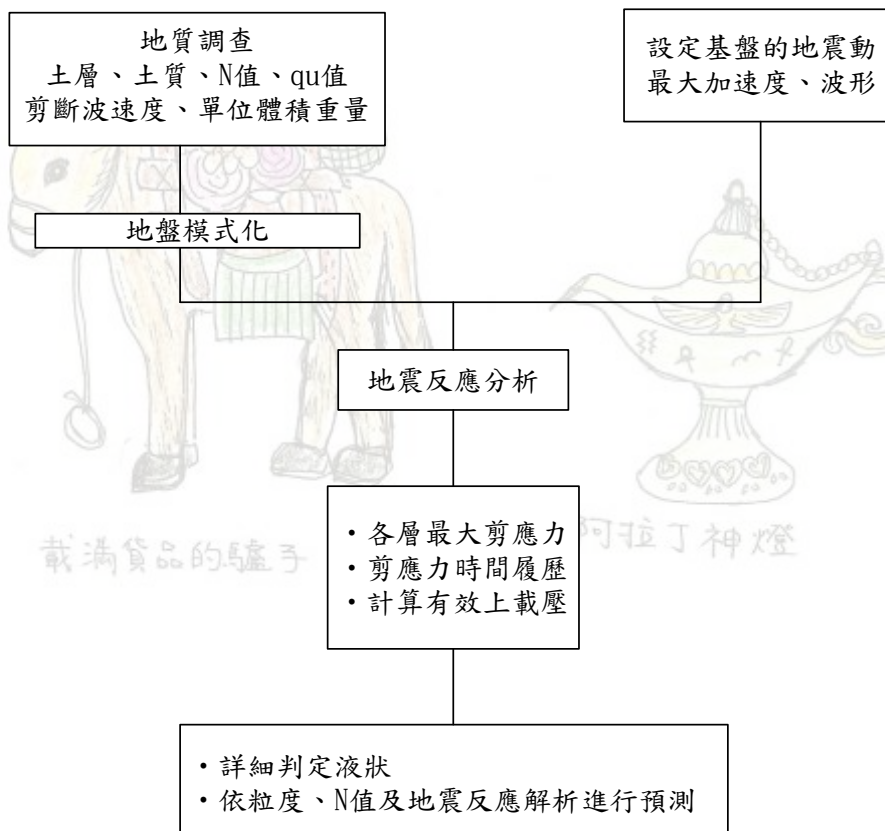
$$\text{等價 N 值} = N + \Delta N$$

iii. 塑性指數 $10 \leq I_p < 20$

如同 ii 取得等價 N 值，檢查屬於預測流程表中的層級，若屬 I、II 層級依流程進行判別。若屬 III、IV 層級，從計算等價 N 值重新進行，即將(A)式求得等價 N 值除以修正係數 0.5 作為新的等價 N 值，依流程表檢查所屬層級，屬 IV 判定為 IV，其他情況則判定為 III。

(2) 等價加速度

震源發生的地震波在地殼中傳播，從基盤經過表層地盤到達地表過程中，在表層地盤中地震波變化最為激烈。計算液化判別用地中剪應力，依下列流程，設定基盤地震動，以此為輸入條件，進行表層地盤地震反應分析。



基盤者為，岩盤或土層以深 N 值為 50 以上砂質土層，單軸壓縮強度(q_u 值) 為 637kPa 以上黏土層，或剪斷波速度為 300m/s 以上的土層。表層地盤指基盤上方地盤。計算地盤地震反應時，宜選定適切精度、省人力及時間而能計算出地中剪應力的方法，依土壤數據將表層地盤作適當理想化。若有地表最大加速度的簡易推算公式時可參考之，不用地震反應解析。

① 基盤地震動

作為地盤地震反應解析輸入條件的地震動最大加速度依地震力所述設定。

② 地盤地震反應計算法

地震動振幅及波形，從震源至到達地表為止一直變化，尤其是在比較軟弱、組成複雜表層地盤中傳播時更為複雜。即地震時表層地盤中產生的加速度或應力會有複雜變化，探討液化現象時必須特加留意。本文採用 1 維等價線形重複反射模式，作為計算地盤地震反應解析。目前大多採用 Schnabel 等開發的「SHAKE」為多。

③ 地盤理想化

2011 埃及尼羅河之旅

理想化方法及所需參數隨使用模式而異，1 維等價線形重複反射模式，計算地盤地震反應解析時，將地盤分割成數層，理想化必要參數為，各層土質、地下水位、層厚、土壤單位體積重量、表示剪應變函數的剪彈性係數及衰減係數。

④ 依地盤反應解析結果預測判別液化

由地震反應解析求得最大剪應力，依下式計算各土層的等價加速度 α_{eq}

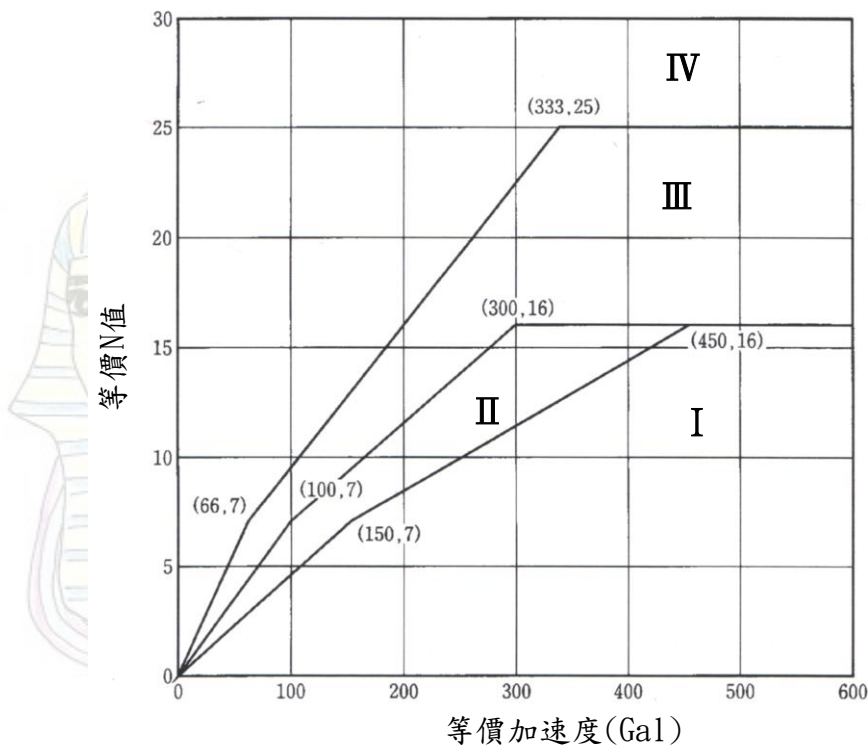
$$\alpha_{eq} = 0.7 \frac{\tau_{max}}{\sigma'_v g}$$

τ_{max} : 最大剪應力(kPa)

σ'_v : 有效上載壓力(kPa)

g : 重力加速度(Gal)

依等價 N 值及等價加速度，由下圖判定是否產生液化。



利用等價N值及等價加速度判別液化

⑤ 液化判別方法

- i. 判別各土層是否液化，基本上是利用等價N值及等價加速度，依上圖視其坐落範圍，由下表決定。

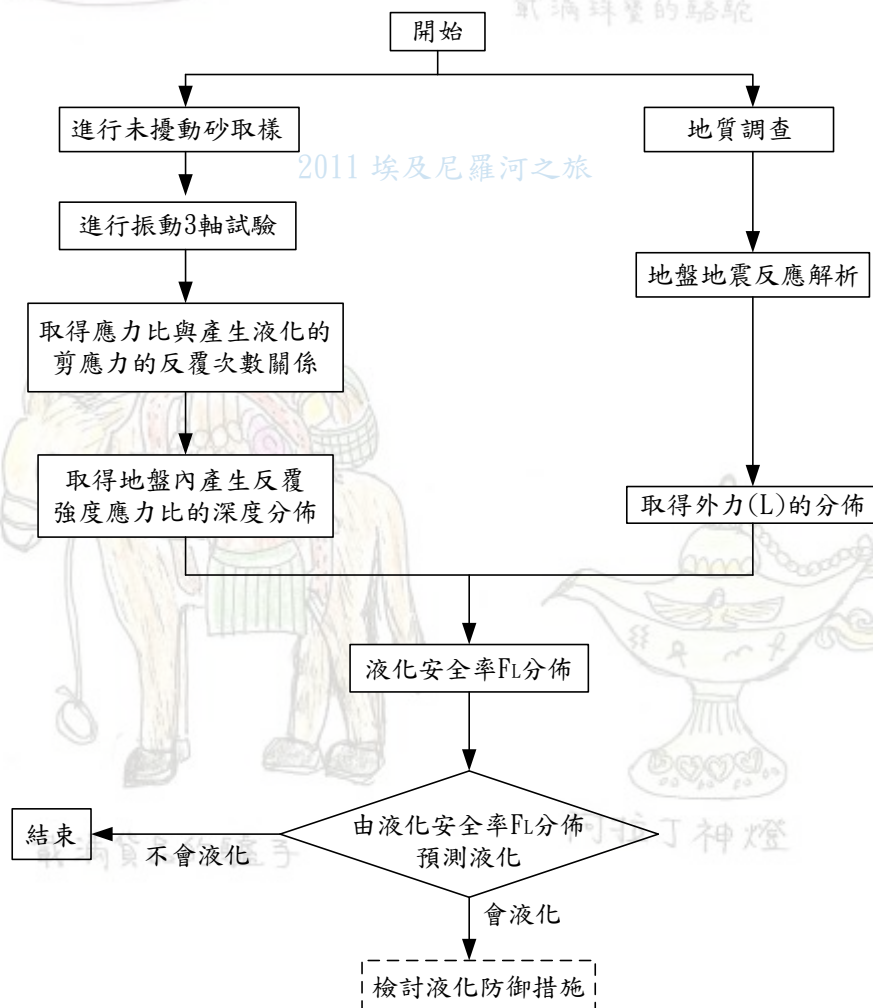
範圍	利用粒度及N值預測	利用粒度及N值判別
I	會液化	判別會液化
II	極有可能液化	判定會液化或由振動3軸試驗判別
III	極有可能不會液化	判定不會液化或由振動3軸試驗判別
IV	不會液化	判別不會液化

- ii. 判定各土層會液化時，考量土層厚度及其存在深度，綜合判斷整體地盤是否會發生液化。通常發生液化的地盤會有噴砂、噴水、下陷等現象發生。本判別法所謂液化是指會發生噴砂、噴水、下陷等狀況的液化。綜合判斷整體地盤有困難時，可參考下表。

	整體地盤綜合判斷	土壤組成
①	判斷會液化	依粒度及 N 值判定會液化的土層厚度共 2.5 公尺以上
②	判斷不會液化	依粒度及 N 值判定會液化的土層及應依振動 3 軸試驗判斷土層厚度合計未滿 2.5 公尺
③	由地震反應解析判斷	
④	由振動 3 軸試驗判斷	

3) 利用振動 3 軸試驗判別

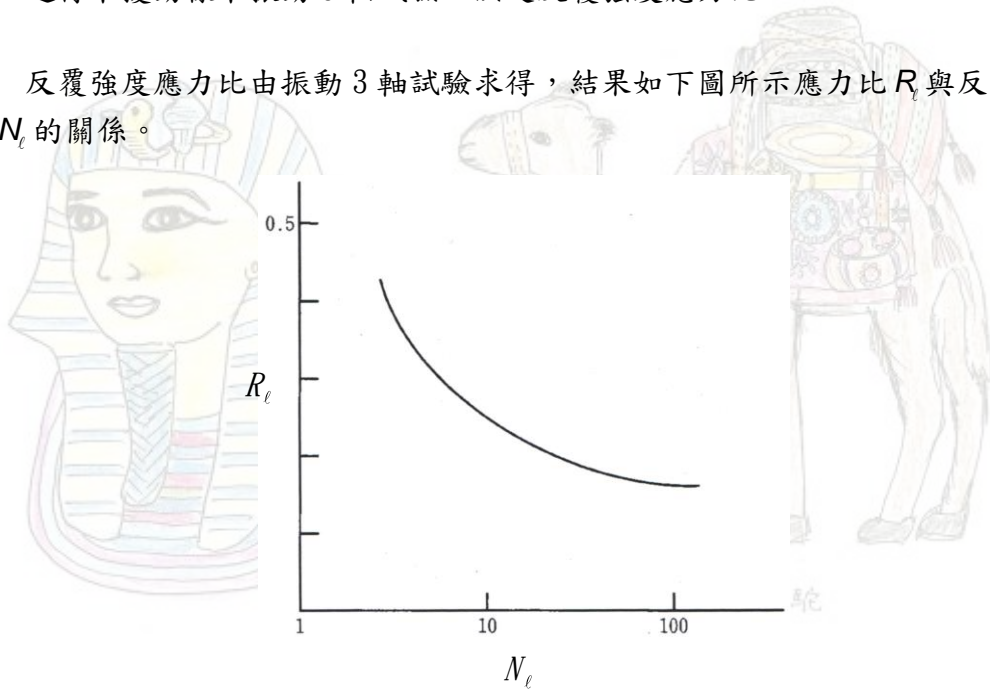
利用粒度及等價 N 值、等價加速度預測地盤是否會發生液化，無法判定有無液化時，可進行未擾動振動 3 軸試驗，比較地震時土中剪應力與對地盤液化強度，依下表預測判斷是否會發生液化。



預測步驟為：

- ① 進行未擾動樣本振動 3 軸試驗，決定反覆強度應力比。

反覆強度應力比由振動 3 軸試驗求得，結果如下圖所示應力比 R_ℓ 與反覆次數 N_ℓ 的關係。



液化強度曲線
2011 埃及尼羅河之旅

預測判定液化用反覆強度應力比 R 是將由振動 3 軸試驗取得應力比 R_ℓ ，依下式修正而得。

$$R = \frac{0.9(1 + 2K_0)}{3} R_\ell$$

K_0 ：靜止土壓係數(通常取 0.5)

R_ℓ ：反覆強度應力比(反覆波數為 N_ℓ 時發生液化所需反覆剪應力 τ_ℓ 除以拘束壓 σ_c)

0.9: 多方向剪斷減低率

- ② 由地震反應解析決定地盤內產生的反覆剪應力比。

地盤各深度反覆剪應力 τ_d ，由地震反應解析決定。最大反覆剪應力為 τ_{dmax} ，該深度有效上載壓力為 σ'_v 時，最大反覆剪應力比 L_{max} 可依下式計算

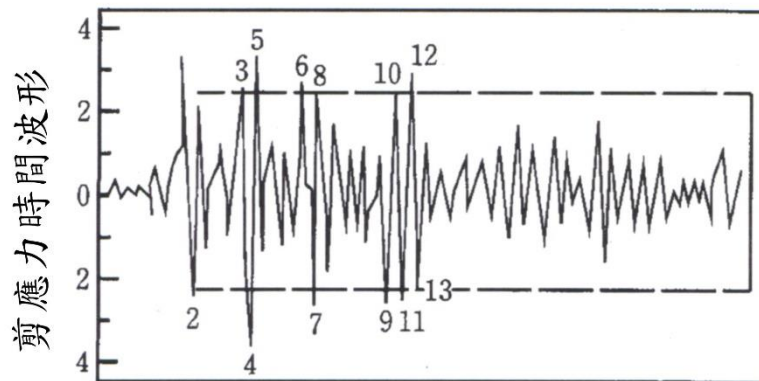
$$L_{max} = \frac{\tau_{dmax}}{\sigma'_v}$$

為修正載重的不規則性，將一定振幅的剪應力比 L ，依下式計算為

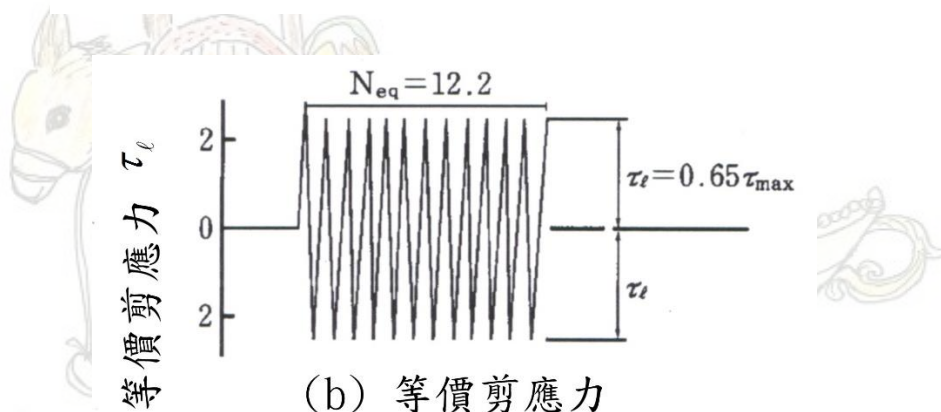
$$L = \frac{\tau_t}{\sigma'_v} = 0.65L_{\max}$$

③ 等價波數 N_{eq}

將剪應力的不規則波形時間履歷，視為一定振幅 τ_t 的正弦波，最大值為 $\tau_{d\max}$ 時的等價波數 N_{eq} ，可依下列方法計算。計算等價波數 N_{eq} 時，利用下圖所示反覆強度應力比 R 與波數 N_f 的關係。



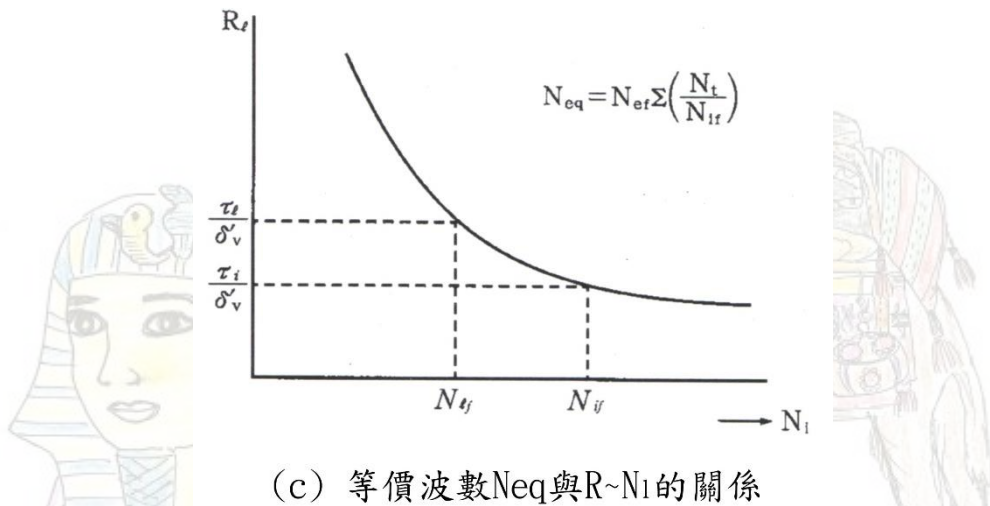
(a) 地中剪應力



(b) 等價剪應力

載滿貨品的驢子

阿拉丁神燈



依地盤地震反應解析取得剪應力中，振幅為 τ_i 的波數量以 N_i 表示，剪應力為 τ_i / σ'_v 時發生液化所需反覆波數為 N_{if} ，利用 $R \sim N_l$ 曲線、由 τ_i / σ'_v 得到 N_{lf} 、由 τ_l / σ'_v 得到 N_{lf} 、然後依下式得到等價波數 N_{eq}

$$N_{eq} = N_{lf} \sum \frac{N_i}{N_{if}}$$

④ 液化安全率 F_L

利用 $R \sim N_l$ 曲線，對 N_{eq} 求得 R 值，以 $R(N_{eq})$ 表示，則安全率

$$F_L = \frac{R(N_{eq})}{L}$$

⑤ 判別液化

$F_L \geq 1$ 時不會發生液化

$F_L < 1$ 時會發生液化

土層一部份液化，但厚度薄時不會影響土層整體安定。因此應對整體地盤作綜合判斷

- i. $F_L < 1$ 及依粒度· N 值法判定為會液化土層，合計土層厚度大於 2.5 公尺時，判定為會液化。

- ii. $F_L < 1$ 及依粒度·N 值法判定為會液化土層，合計土層厚度未滿 2.5 公尺時，判定為不會液化。



回港灣設施設計



回港灣設計參考資料

載滿珠寶的駱駝

2011 埃及尼羅河之旅



載滿貨品的驢子



阿拉丁神燈