

員林地區集集大地震土壤液化評估案例探討

蘇鼎鈞 王劍虹

亞新工程顧問股份有限公司

摘 要

921集集大地震之芮式規模高達7.3，不僅對橋樑和建築結構等造成重創外，地震當時，台灣中部更有許多地方產生土壤液化現象，其中又以員林地區之大區域土壤液化最為嚴重且最廣為人知，而現場之液化現象包括有地表噴砂、地層下陷、建築物沉陷、建築物傾斜和溝渠等構造物水平側移等。

本文將以員林地區集集大地震之液化評估為例，介紹土壤液化之評估流程與方法，包括現場之地質調查結果以及液化潛能之回饋分析，經比較SPT-N法和CPT法所計算出之液化潛能指數，其變化趨勢雖然類似，但數值差異卻很大，整體而言，以Seed方法配合液化潛能指數(P_L)的評估結果與現地液化表徵的分布最為一致，即在本次員林地區集集大地震案例回饋分析中的表現最佳。

關鍵字：集集大地震、土壤液化。

CASE STUDY ON SOIL LIQUEFACTION OF CHI-CHI EARTHQUAKE IN YUAN-LIN

SU TING-CHIUN WANG CHIEH-HONG

MOH AND ASSOCIATES, INC.

ABSTRACT

Chi-chi earthquake, with a magnitude of 7.3 (Richter scale), not only caused severe damages to bridges and buildings, but also resulted in soil liquefaction in many areas in central Taiwan. The Yuan-Lin in Chang-Hua County suffered extensive damages, including soil liquefaction, subsidence, settlement and tilt of buildings, lateral movement of ditches, etc.

This article presents the process and analysis methods for liquefaction during Chi-Chi earthquake in Yuan-Lin, including site investigation and back analysis result. The liquefaction potential using SPT method and CPT method varies a lot, but the tendency is quite similar. Generally speaking, the results calculated by Seed's method incorporated with liquefaction potential index well match the field evidence caused by liquefaction. It is considered that Seed's method is the most suitable one in this study of liquefaction in Yuan-Lin in Chi-Chi earthquake.

KEY WORDS : Chi-Chi earthquake, soil liquefaction.

一、前言

土壤液化(liquefaction)一般係指飽和疏鬆砂土在地震力或反覆振動作用下，造成土壤中超額孔隙水壓的上昇，俟土壤中的孔隙水壓升高至與土壤顆粒所承受的垂直壓力相同時，則土壤的有效應力降為零而產生液化。如果發生液化的砂層位置較淺，其上方覆蓋的未液化土層厚度又很薄時，則可能有地表破裂、噴砂及大量沉陷之土壤液化表徵。

由土壤液化的成因來看，具有下列條件者，有較高的液化潛能：

- 1.地下水水位較高者。
- 2.土壤中主要為飽合之疏鬆細砂或粉土質砂，且分布深度較淺者。
- 3.地震規模較大、地表加速度較大、場址地震強度放大效應較強者。

民國88年9月21日凌晨1：47分發生之集集大地震，芮氏地震規模高達7.3，震央位於北緯23.85度，東經120.81度，即在於日月潭西偏南12.5公里，依中央氣象局之日月潭測站(TCU110)量測結果，東西向之水平地表加速度高達989gal，造成台灣中部許多地方發生土壤液化之現象，陸續有被報導者包括有台中港1~4A號碼頭及貨櫃碼頭，彰濱工業區之試車中心，南投縣貓羅溪沿岸之軍功里和振興里，台中縣伸港鄉大度溪岸，霧峰鄉乾溪和草湖溪兩岸之太子城堡、省議會高爾夫球場及停車場、四德路一帶，太平鄉土地公坑溪光興路上光隆橋一帶以及彰化縣員林鎮、大村鄉、社頭鄉等地，其中又以員林地區之大區域土壤液化最為嚴重且最廣為人知。

本文將以員林地區921大地震後之土

壤液化調查和評估為例，摘錄現場地質調查及液化潛能分析評估成果，期提供地工界作為類似案例調查和評估時之參考。

二、土壤液化之評估方法與流程

有關本次員林地區之土壤液化評估主要係參考國際土壤力學與基礎工程學會大地地震工程技術委員會在「大地地震危害分區手冊」(ISSMFE TC4, 1993)中所建議之三級調查法進行評估。有關各級調查之項目與方法分述如后：

1. 第一級(簡略分區)

主要係利用現已公開之資料，並根據過去地震及發生液化現象之紀錄，對調查區域作大致的分區。其內容包括：

(1) 依據過去之地震紀錄

調查區域的地震活動狀況可依現有之地震紀錄進行統計，而液化區域之範圍則可由地震的規模及震度粗略推估而得。此外，根據研究顯示，嚴重之液化災害多發生於震度大於或等於五級(JMA scale)之區域，比較輕微的液化現象亦多發生於震度大於或等於四級(JMA scale)之區域。

(2) 依據過去之液化現象紀錄

根據研究顯示，液化現象常在同地點一再地發生。因此，過去曾發生液化現象之地點，在未來的地震中發生液化之機率亦較未發生過液化現象之地點為高。如將過去的液化紀錄與區域地質狀況加以比較，應可作為工程師判斷液化與否之重要依據，Iwasaki et al.(1982)分析了數十個日本地震引致的液化案例，提出區域地質狀況與液化現象間之關係如表一所示。

表一 可能發生液化之地質(IWASAKI,1982)

等級	地質	液化潛能
A	現有河床、古河道、沼澤、新生地、谷地	最可能發生液化
B	沖積扇、天然土堤、沙丘、沖積平原、河灘、海灘、平原地	可能發生液化
C	台地、丘陵、山地	較不會發生液化

2. 第二級(詳細分區)

在第一級分區中僅能提供區域性的液化潛能評估，如須對特定工址作液化潛能評估，即需要進一步的資料蒐集及研判，包括：

- (1) 航照圖
- (2) 現場勘查成果
- (3) 洪水過後不久所拍攝的航照圖
- (4) 當地居民訪談以瞭解過去之地震影響及液化現象

第二級分區與第一級分區之工作內容雖然大同小異，但所需蒐集的資料及整理工作卻遠為繁瑣，其費用亦通常為第一級分區工作之數倍。

3. 第三級(精準分區)

第三級分區通常需要進行額外的現場鑽探調查及試驗室試驗，再根據調查及試驗之結果，分析土層之抗液化強度，其次推估在地震下土層所受之最大剪應力，進而計算其液化潛能。

有關液化潛能之分析方法，由簡而繁大致可以分成三個層次，第一層次就是經由歷年累積下來的案例研究所建立的經驗公式，以安全係數是否大於1的方式評估土層之液化潛能，例如應用標準貫入試驗(SPT)的Seed(1997)、JRA(1996)、T&Y(1983)及圓錐貫入試驗(CPT)的Roberson & Wride(1997)、Olsen(1997)等方法；第二個層次就是假設土壤呈線性行為，而以擬線性的方式考慮土壤勁度隨應變增長而折減的特性，由土壤受地震作

用下土層之反應，例如最大剪應力隨深度之分佈，作為評估液化之標準，但此法無法考慮孔隙水壓之因素，且土壤抗液化強度需由試驗(現場試驗或試驗室試驗)求得，這種分析常稱總應力分析法(Total Stress Analysis)，SHAKE程式是一個最具代表性與歷史價值的分析方法；第三個層次也就是有效應力分析法(Effective Stress Analysis)，這種方法理論架構最為嚴謹，相對的，也較為複雜，功能上來說，有效應力分析可由土壤的非線性行為及達西定律計算孔隙水壓的反應及傳遞，進而可判定液化可能發生的深度及後續孔隙水壓消散的影響，由於有效應力分析法可以充份模擬土壤在地震作用下的可能反應，因此在瞭解發生液化深度之後，亦可經由參數研究(Parametric Study)的方式評估不同土壤改良方案之成效。

有關本次員林地區之土壤液化調查及評估工作流程詳圖一所示。

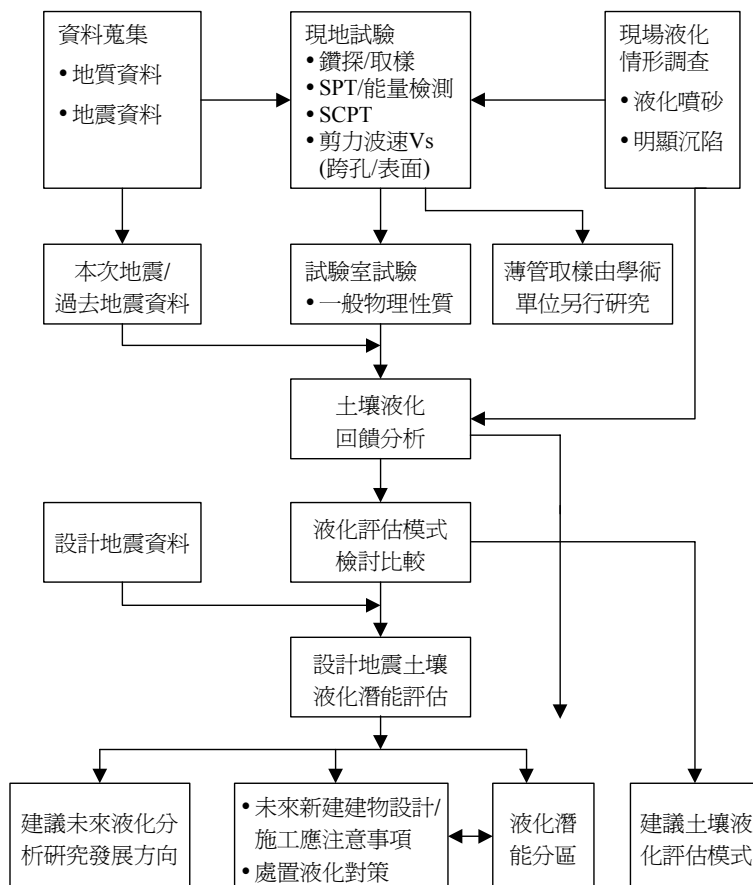
三、地層特性與地下水概況

3.1 資料蒐集

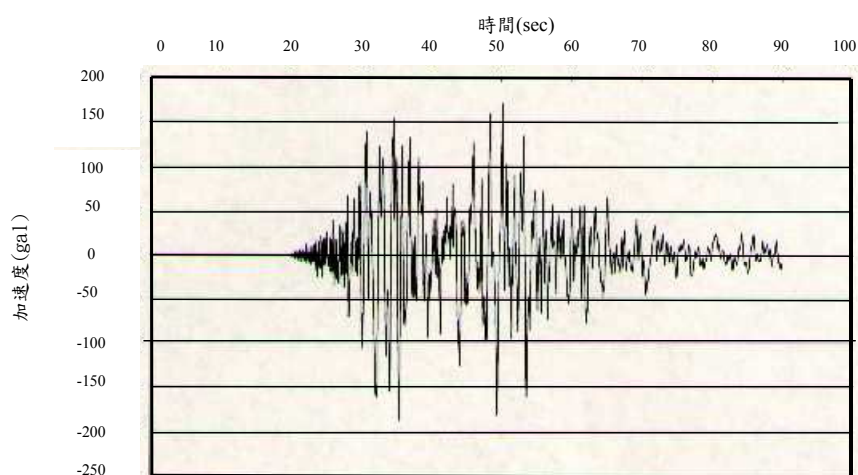
本次調查評估所蒐集之資料包括經濟部中央地質調查所在員林地區及附近鄉鎮之探井資料，以及國家地震工程研究中心所提供之地震紀錄及相關之地震歷時曲線。圖二為位於員林國小之員林測站(TCU110)，在集集大地震主震時之南北向地震歷時曲線，而其垂直向/水平東西向/水平南北向之地表最大加速度則分別為116gal/178gal/188gal。

3.2 現地勘查

在地震過後，有相當多的專業人士，



圖一 液化調查及評估工作流程



圖二 員林測站之南北向地震歷時曲線

包括國家科學委員會和國家地震工程研究中心的人員至各地調查。根據筆者等所進行之現地勘查和訪談當地里、村長及居民的結果發現，土壤液化在當地引致之現象主要包括有地表噴砂、地層下陷、建築物沉陷、建築物傾斜和溝渠等構造物水平側移等。

有關現場液化現狀之調查成果詳蘇鼎鈞等人(2000)「員林鎮土壤液化現狀調查成果及初步研判」一文中所述。

3.3 現場調查

為進行員林地區之液化回饋分析和液化潛能評估，本次調查共佈設50個鑽探孔，鑽探過程中，採用自動落錘進行標準貫入試驗，並配合落錘能量檢測以獲取標準貫入試驗之實際輸入能量，提供液化潛能評估之用；另於土層適當深度以薄管採取不擾動土樣，並送交學術單位進行後續之研究。各鑽探孔完成後，部份鑽孔即埋設地下水觀測井及水壓計，以量測地下水位和水壓之分布情形。

本次調查亦佈設45個震測錐孔，即以附有震波接收器之電子錐貫入土壤，除可測知土層之連續性變化及土層阻抗能力外，並可利用震波接收器記錄土層每隔一公尺深度，地面產生之剪力波傳遞時間。由此計算得剪力波速，可藉以配合土層狀況推估各層次之土壤動力性質參數。此外，本次調查亦進行6組跨孔剪力波波速量測和4處表面反射波波速量測，以求取土層之剪力波速。

3.4 區域地質概況

員林地區位於彰化縣東側，屬於西部平原地質區，地層主要為第四紀之沖積

層。由沉積環境分析，員林地區係屬於濁水溪沖積扇之一部份。北方為八卦山背斜所造成之八卦台地，南邊則有斗六背斜所造成之斗六丘陵。

台灣地區自上新—更新世以來受蓬萊造山運動影響，造成一系列東北—西南走向之覆瓦狀低角度之逆衝斷層。員林地區附近主要地質構造有屯子腳斷層、車籠埔斷層、彰化斷層及梅山斷層等。其中彰化斷層以略呈南北走向，延伸通過員林地區，為存疑性活動斷層。而屯子腳斷層、車籠埔斷層及梅山斷層均為活動斷層，分別為1935年新竹—台中、1999年集集及1906年嘉義大地震造成之地震斷層，距離員林地區分別約35、10及40公里。

3.5 土層分布概況

由現場調查之結果顯示，員林地區地表下深度50公尺內之土層可概分為九個主要層次：

1. 第一層次：回填層；分布於地表至地表下3m之間，平均厚度約1.5m。
2. 第二層次：粉質細砂至粉質中細砂層；分布於地表至地表下9m之間，平均厚度約3m，為本次地震液化噴砂之主要來源，其分布以崙雅里地區較厚，員林鎮北部和西部之局部地區，本層次則有尖滅情形。具極疏鬆至疏鬆程度。
3. 第三層次：粉質粘土層，分布於地表至地表下17.5m之間，平均厚度約4m，本層次以員林鎮中部、北部和西部較厚，南部和八卦台地附近則較薄，甚至有尖滅情形。具極軟弱至中等堅實稠度。
4. 第四層次：粉質細砂至粉質粗中細砂層；分布於地表下4m至24m之間，平均厚度約8.5m，以員林鎮東部和南部分

布較厚。具疏鬆至中等緊密程度。

5. 第五層次：粉質粘土層；分布於地表下12m至30m之間，平均厚度約5.5m，本層次在八卦台地附近有尖滅之現象。具中等堅實至極堅實稠度。

6. 第六層次：粉質細砂至粉質粗中細砂層；分布於地表下7.7m至34m之間，平均厚度約9.5m。八卦台地附近之鑽孔資料顯示為砂礫石層，出現深度分別為12.9和7.7m。中等緊密至極緊密程度。

7. 第七層次：粉質粘土層；分布於地表下29m至44m之間，平均厚度約7m。具堅實至極堅實稠度。

8. 第八層次：粉質細砂至粉質粗中細砂層，分布於地表下34m至大於50m之間，平均厚度粗估約10m。中等緊密至極緊密程度。

9. 第九層次：粉質粘土層；分布於地表下46.5m以下。具堅實至堅硬稠度。

3.6 地下水位及水壓分布概況

有關員林地區之地表高程約介於EL.+20.0m至EL.+33.0m之間，地勢大致呈東南高西北低，地下水位大致位於EL.+18.0m至EL.+25.0m(其中最淺者約位於地表下0.5m，最深至地表下4.0m)之間，地下水位大致呈靜態水壓分布，深層地下水壓有局部區域略低於靜態水壓，其地下水位高程分布圖如圖三所示。

3.7 液化地區土壤特性

本次集集大地震中地表噴砂樣之粒徑分布曲線如圖四所示，顯示土壤液化所噴出之砂土，細粒料含量約介於10%至45%之間，不具塑性，屬於較容易液化的土壤，與過去之經驗一致。

四、液化潛能分析成果

4.1 液化潛能分析參數

本次液化潛能分析所採用之各項分析參數如下：

1. 地震規模：採用力矩地震規模 $M_w=7.5$

2. 地表加速度：採用員林國小測站之加速度測值0.19g進行分析

3. 地下水位：採用88年11月5日至88年12月3日期間之地下水位觀測結果

4. 落錘能量：液化分析前，先依落錘能量檢測結果對SPT之N值進行修正。

4.2 分析結果之比較

本次土壤液化潛能之分析工作係依據ISSMFE(1993)中之精準分區方法進行，乃利用目前國際間最新修正之液化分析方法進行液化評估，包括

1. SPT-N法

(1) NCEER修正之SEED簡易經驗法(1997)，簡稱Seed方法。

(2) Tokimatsu & Yoshimi簡易經驗法(1983)，簡稱T&Y方法。

(3) 日本道路協會簡易經驗法(JRA，1996)，簡稱JRA方法。

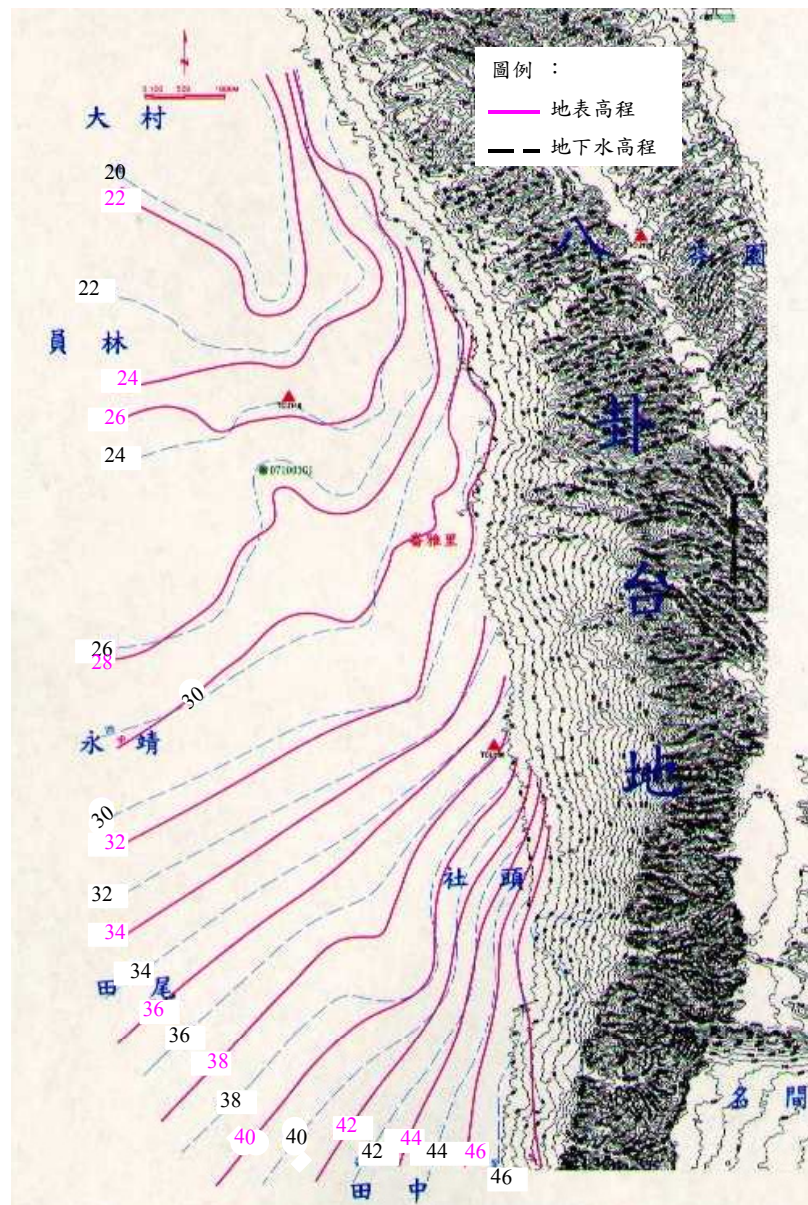
2. CPT法

(1) Roberson and Wride評估法(1997)，簡稱R&W方法。

(2) Olsen評估法(1997)，簡稱Olsen方法。

有關土壤抗液化安全係數分析比較結果綜整如下：

1. 疏鬆砂性土壤：土壤抗液化安全係數以T&Y方法分析結果最高，其次依序為Olsen方法、JRA方法、Seed方法，最低者為R&W方法。

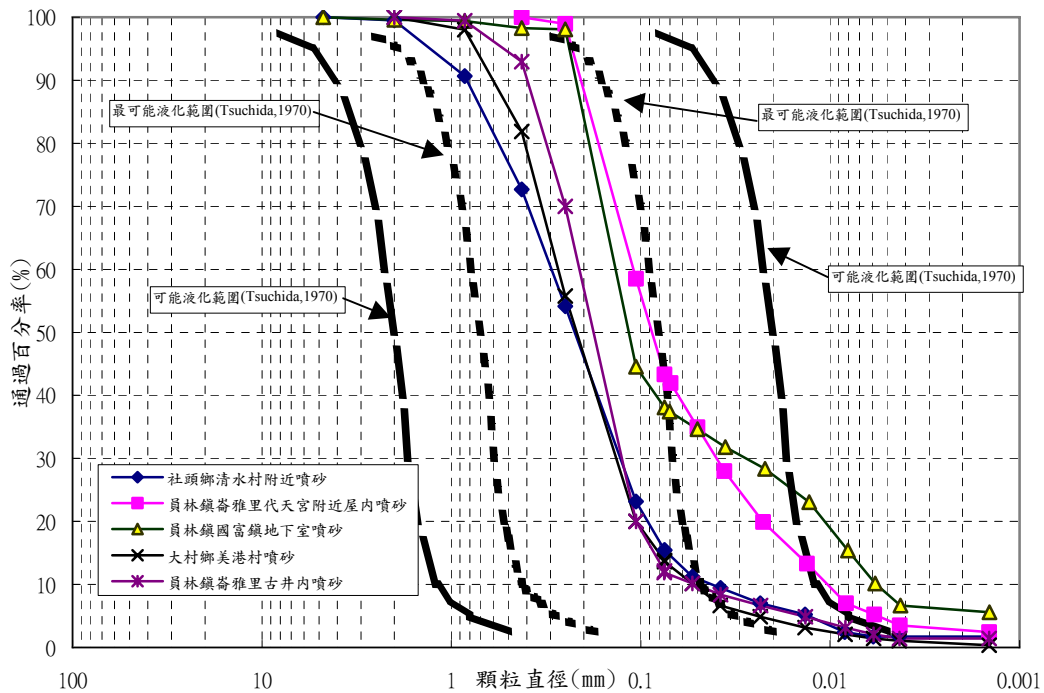


圖三 員林地區地表高程與地下水位高程等高線

2. 中等緊密砂性土壤：土壤抗液化安全係數以Seed方法分析結果最高，其次依序為T&Y方法、JRA方法、R&W方法，最低者為Olsen方法。

分析結果顯示，R&W方法除對中等

緊密砂性土壤分析之安全係數稍高於Olsen方法外，其餘均最低，而且趨勢明顯，顯示其分析結果一般較為保守。另Seed方法除對中等緊密砂性土壤(及緊密砂土)分析之安全係數高於其他方法外，對



圖四 噴砂土樣粒徑分布曲線

其他土壤分析結果均低於 JRA 和 T&Y 方法，其中一個重要因素是在於土壤細料含量對土壤抗液化強度的影響程度，即 Seed 方法對高細粒料含量能提高土壤抗液化強度的效果，其修正值或幅度較 JRA 和 T&Y 兩種方法為低所致。

五、液化回饋分析與員林地區液化潛能分區

5.1 液化回饋分析成果

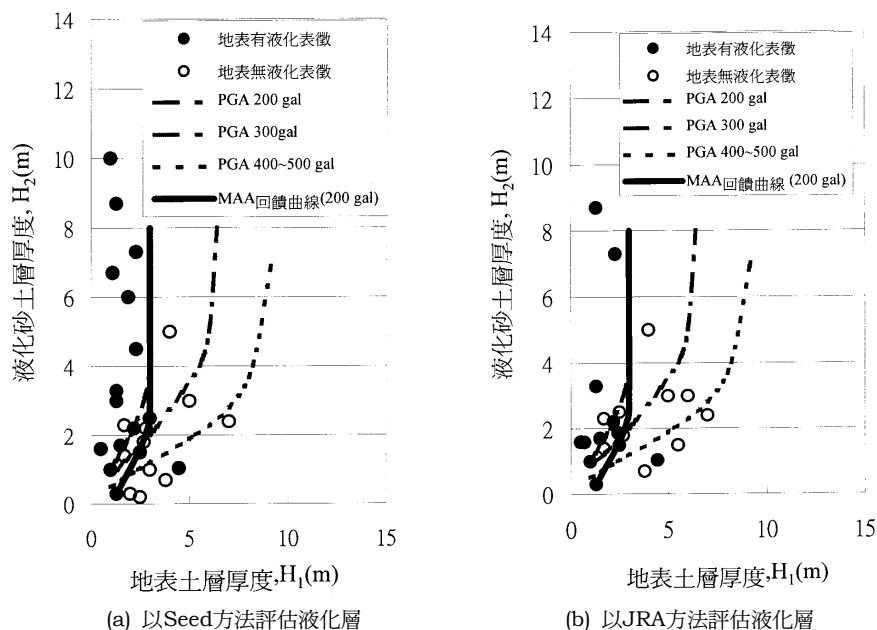
本次液化潛能回饋分析工作主要包括以下兩部份：

1. 液化土層與被覆非液化土層相對厚度之關係

本次集集大地震在員林地區的東側

與市中心區之液化表徵上有相當大的差異，根據鑽探結果顯示，大量噴砂與沉陷的崙雅里(東南側)，其液化土層上方被覆之非液化土層甚薄，而員林鎮市區之地表下則有相當厚度之非液化土層(粘土)被覆在潛在液化土層上方。Ishihara(1985)根據新瀉地震及唐山地震之觀測資料，整理出一份經驗圖表，用以決定液化是否會造成對地表的顯著影響。該方法以地表未液化土層厚度(H1)與液化土層厚度(H2)進行比較，如圖五所示，其中液化砂層H2厚度是使用經過研判會液化的N值($N \leq 10$)及其分布範圍來決定。故實際應用時，須注意可能液化土壤N值之研判，應考量地層與地震特性，經由液化分析或研判來決定。

為探討員林地區土壤發生液化對地表造成之影響，乃以地表未液化土層和液



圖五 地表發生液化破壞現象建議曲線(ISHIHARA,1985)

化土層相對厚度之關係進行比較。首先過濾出地表發生明顯液化表徵和沒有液化表徵之鑽孔位置，若不確定是否屬於前述二種情形者，則予以排除。其次分別考量各鑽孔地下水位及利用Seed方法和JRA方法決定液化土層深度分布範圍後，完成員林地區液化土層相對厚度影響之比較如圖五所示。比較結果顯示有液化表徵和無液化表徵數據分布情形，均與Ishihara(1985)研究結果中提出之地表加速度200gal的分界曲線有相當程度的吻合，驗證了是否會出現液化表徵，確實而且顯著的受到液化土層與被覆非液化土層相對厚度之影響。此外，Ishihara(1985)研究結果中，亦有一些具有液化表徵而液化土層厚度較薄者，即其數據點座落於曲線右側之無液化表徵之區域，故根據本次集集大地震員林地區之液化現況及液化潛能評估結果，建議將Ishihara(1985)之

200gal分界曲線下段略為向右修改成如圖五所示之曲線。

2. 液化潛能指數

液化潛能指數PL(Iwasaki et al., 1982)定義了地盤液化之嚴重程度，其量化值可以下列公式計算：

$$PL = \int_0^{20} F(z)W(z)dz$$

其中

PL=液化潛能指數，介於0~100。

z = 地盤深度(m)，考慮深度範圍為0~20m。

$F(z) = 1 - FL(z)$ ，其值介於0~1之間。

$F(z)$ = 抗液化係數，

若 $FL(z) > 1$ ，則 $F(z) = 0$ 。

$FL(z)$ = 抗液化安全係數

$W(z)$ = 深度權重係數

$W(z) = 10 - 0.5z$

參考Iwasaki et al.(1982)根據對日

本地震案例之研究，建議將地盤可能液化的嚴重程度分為四級，如下所示：

* $PL \geq 15$ 高度液化潛能，地表發生明顯液化表徵機會較高，如噴砂或顯著沉陷等現象。

* $5 \leq PL < 15$ 中度液化潛能，地表發生明顯液化表徵機會低，但深層可能液化，地表沉陷量不明顯。

* $0 < PL < 5$ 輕度液化潛能，液化之可能性很低。

* $PL = 0$ 非液化潛能區。

分析結果顯示，利用SPT-N值方法和CPT方法所計算出之液化潛能指數，其數值變化趨勢雖然類似，但數值差異卻很大。

在SPT-N法中，以Seed方法評估之PL數值較高，PL值分布在0~33之間，有液化表徵地點的PL值平均約17，無液化表徵地點的PL值平均約12；JRA方法次之，有液化表徵地點的PL值平均約6，無液化表徵地點的PL值平均約5；T&Y方法則最低，有液化表徵地點的PL值平均約5，無液化表徵地點的PL值平均約3。評估結果若以Iwasaki(1982)所建議之液化災害嚴重程度分級，則對於有液化表徵地點的PL值，以Seed方法最為接近。

在CPT法中，以R&W方法評估之PL數值較高，PL值分布在13~35之間，有液化表徵地點的PL值平均約29，無液化表徵地點的PL值平均約26；Olsen方法較低，有液化表徵地點的PL值平均約12，無液化表徵地點的PL值平均約8。評估結果以Iwasaki(1982)所建議之液化災害嚴重程度分級，則以Olsen方法較為適當，而R&W方法PL值則顯得偏高。

由各種評估方法之液化潛能指數等值線分布圖顯示，利用SPT-N值方法的評估結果與現地液化現狀調查結果進行回饋

比較，以Seed方法最為一致。利用CPT方法的評估結果，則以Olsen方法較佳。整體上而言，則是以Seed方法在本次集集大地震員林地區案例中表現最佳。

5.2 液化潛能分區

經比較不同評估方法之分析結果以及檢討液化土層相對厚度的影響，同時亦比對液化現狀調查結果，可推得員林地區集集大地震液化潛能等值線分布綜整圖如圖六所示。

六、結論與建議

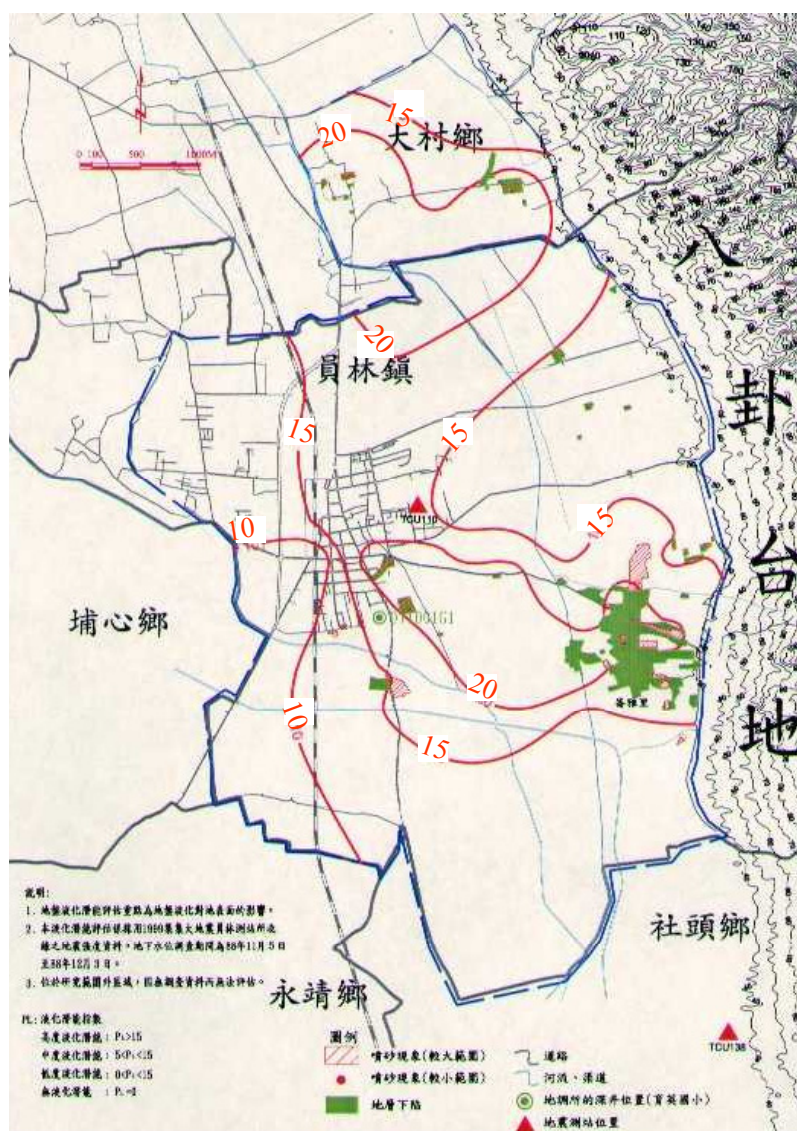
根據本次集集大地震員林地區之液化現況及液化潛能評估結果，建議將Ishihara(1985)之200gal分界曲線下段略為向右修改成如圖五所示之曲線。

以員林地區集集大地震為例，利用SPT-N值方法和CPT方法所計算出之液化潛能指數，其數值變化趨勢雖然類似，但數值差異卻很大。

本次之液化回饋分析中，在SPT-N值方法中以Seed方法配合液化潛能指數(PL)的評估結果與現地液化表徵的分布最為一致；而在CPT方法的評估結果，則以Olsen方法較佳。整體上而言，則以Seed方法在員林地區集集大地震案例回饋分析中的表現最佳。

致 謝

員林地區之土壤液化評估與對策研擬工作係由國科會委託亞新工程顧問公司辦理，本計畫執行時間，承蒙國家地震工程研究中心羅俊雄主任和國立台灣大學翁作新教授、陳正興教授和林美聆教授協助



圖六 員林地區集集大地震液化潛能指數等值線分佈綜合圖

審查並提供卓見，本文撰寫期間，亦蒙總經理莫若楫博士之鼓勵，宋騰烽副總經理和黃南輝博士提供寶貴意見與指正，以及姜凱文先生之鼎力協助，特此一併申謝。

參考文獻

蘇鼎鈞、姜凱文、林向榮、王復國、段紹緯 (2000)，「員林鎮土壤液化現狀調查成果及初步研判」，地工技術，第77期，pp29~38。

- 日本道路協會(1996), 道路橋樑示方書 同解説(I 共通編, VI 下部構造編, V 耐震設計編).
- ISHIHARA, K. (1993) "Liquefaction and Flow Failure during Earthquake" *Geotechnique*, Vol.43 No.3. pp. 351-415.
- ISHIHARA, K. (1985) "Stability of Natural Deposits During Earthquakes," *Proceedings of the Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, Netherlands. pp. 321-376
- IWASAKI, T., ARAKAWA, T. AND TOKIDA, K. (1982), "Simplified Procedure for Assessing Soil Liquefaction during earthquakes", *Proceeding of the Conference on Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, Southampton, pp. 925-939.
- OLSEN R. S. (1997), "Cyclic Liquefaction Based on the Cone Penetrometer Test", *Proceeding of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*, Edit by T. L. Youd and I. M. Idriss. NCEER-97-0022. pp. 225-276.
- ROBERSON P. K. AND C. E. WRIDE(1997), "Cyclic Liquefaction and its Evaluation Based on SPT and CPT", *Proceeding of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*, Edit by T. L. Youd and I. M. Idriss. NCEER-97-0022. pp. 41-88.
- TECHNICAL COMMITTEE FOR EARTHQUAKE GEOTECHNICAL ENGINEERING, TC4, ISSMFE, (1993), "Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards" 149pp.
- TOKIMATSU, K. AND YOSHIMI, Y. (1983). "Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT N-value and Fines Contents," *Soil and Foundations*, ISSMFE, Vol.23 No. 4, pp. 56-74.