

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

子計畫：土壤液化及引致變位之機率分析(1)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC91-2625-Z-032-001-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：淡江大學營建系

計畫主持人：黃富國

計畫參與人員：張家瑄

報告類型：完整報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 12 月 31 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

土壤液化及引致變位之機率分析(1)

Probabilistic Analysis for Soil Liquefaction and Induced Ground Deformation

計畫編號：NSC 91-2625-Z-032-001

執行期限：91年8月1日至92年7月31日

主持人：黃富國 淡江大學營建系

一、中文摘要

本研究首先利用國內外土壤液化案例資料，以邏輯迴歸模式迴歸求取液化機率，並建立液化機率與抗液化安全係數之關係。接著，利用九二一地震本土液化案例資料及 Monte Carlo 模擬法，求取液化潛能指數 LPI、權重液化機率 P_{LW} 及液化後地盤沉陷變位量 S 之年超越機率，並與各損害指標分類比較，驗證了本研究所建立分析模式之可信度。該模式可套用於 Haz-Taiwan 液化震損評估架構，可作為液化微分區之參考，對液化防災工作之推動相當有助益！

關鍵詞：土壤液化、機率分析

Abstract

In this research, liquefaction probability is evaluated first by logistic regression model, which using liquefaction and non-liquefaction database in the world. The relationship between liquefaction probability and factor of safety is then established. Following, liquefaction potential index (LPI), weighted probability of liquefaction (P_{LW}) and settlement after liquefaction (S) are assessed using liquefaction database of 921 Chi-Chi earthquake by Monte Carlo simulation. These results are compared with liquefaction phenomena of sites and classification of liquefaction damage index. The analysis model in this research are thus verified, and can be used in the frame of Haz-Taiwan software for evaluating liquefaction damages. It is beneficial to make liquefaction microzonation and design appropriate countermeasures against liquefaction damages.

Keywords: Soil Liquefaction, Probability Analysis

二、計畫緣由與目的

在強烈地震作用下，地盤振動及土層破壞是造成建築物及各類土工結構損害的重要因素。其中，土壤液化(soil liquefaction)是引致土層破壞的主要原因之一。自從西元 1964 年日本 Niigata 大地震發生土壤液化，使得多數土堤及建築物產生崩塌、維生管線產生毀損，及同年美國 Alaska 發生規模 8.4 的大地震，造成了土壤液化而引發大規模山崩以來，世界各國學者即投注了相當的心力，從事於液化機制、液化潛能評估及液化災害防治等相關工作的研究，但由 1989 年美國 Loma Pieta 地震、1994 年洛杉磯 Northridge 地震、1995 年日本 Kobe 地震，及 1999 年國內九二一集集大震發現，土壤液化及引致震害之防治，仍是大地工程值得繼續重視及研究之重要課題。其中，尤以易發生液化區域之確認，及根據液化嚴重性進行液化地盤敏感性分類，並評估各類液化敏感地盤發生液化之機率，更是液化防災研究、降低液化風險分析之要務。

Haz-Taiwan 是在國科會及經濟部之經費補助下，由美國 FEMA 和 NIBS 引進之震害損失評估方法與應用軟體(葉錦勳, 1999)，可據以進行地震災害境況模擬。為了評估土壤液化之機率及引致之地盤永久變位量(permanent ground deformation, PGD)，以作為工程結構物損害評估的依據，Haz-Taiwan 將各地區的土壤依液化敏感的程度，從“極高”至“無”概分為六級，每一等級的土壤在給定的最大地表加速度(PGA)、地震規模和地下水位條件下，可以估算其液化之機率，以及一旦液化時可能引致的地表沉陷量和側移量，並據以推估建築物或土工結構等的損害程度和數量，將有助於防救災業務的規劃和執行。雖然

Haz-Taiwan 所用之土壤液化潛能評估方法和架構明確，但其分析參數及資料庫係引用自國外，國內目前仍缺乏適合 Haz-Taiwan 使用之本土化液化敏感性地盤分類準則，以及適用之液化機率評估方法。因此，本研究之重點將先由土壤液化案例資料庫之建立，再利用邏輯迴歸法探討現行常用液化評估方法(以 Seed 方法為例，Youd et al., 2001)之適用性，並據以作為不同液化敏感性地盤分類之依據；接著，將藉由地盤之土壤特性，及場址之地震環境，利用 Monte Carlo 數值模擬法，進行液化機率及引致變位之機率分析。最後，則利用九二一地震員林場址之液化與未液化資料進行一案例探討。希望本研究之成果能提供 Haz-Taiwan 進行液化震損評估時，一可供參考之本土化分析模式，並據以採取適當之抗液化對策及措施，以達到減少液化震損、防範液化震害之目的。

三、文獻回顧

與本計畫有關之相關研究主要有二部分：(1)土壤液化敏感(susceptibility)地盤分類及液化潛能微分區(microzonation)；(2)土壤液化及引致變位之機率分析。以下就此二部分分別加以說明及評述。

(a) 土壤液化敏感地盤分類及液化潛能微分區

地震是種自然災害，但液化破壞並非隨意發生，而是在某些地質條件及適當之地盤振動下組合發生，若能事先確定那些地點於地震時較可能受創，便可採取適當之防範措施，達到防災之目的。因此，訂定某些評估準則，將地盤依液化敏感性予以分類，或依場址之液化潛能評估結果予以微分區，便顯得非常有意義。這方面的研究成果有很多，如 ISSMFE(1993), Ishihara & Yasuda(1991), Youd & Perkins(1978), Youd & Perkins(1987), Kavazanjian et al.(1985), Elton & Hadj-Hamou(1990)等。如 Haz-Taiwan 中，即先將土層依液化敏感的程度，概分為極高、高、中、低、極低、無等六級(葉錦勳，1999)，再進行相應之液化機率計算，但對於如何劃分液化地盤敏感等級，則並無具體說明。而上列數篇參考文獻中，較具代表性者首推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「大地地震危害度分區手冊」(ISSMFE, 1993)中所建議的三級評估法，茲將其中各級液化評估與液化敏感地盤分類法條列如下，因第三級分區法較重要，故將詳述之。

(i)第一級分區法(簡略分區)

特點：

1. 為費用最低、評估方法最粗略之土壤液化分區法。
2. 以過去地震所發生液化案例及現有易於取得之報告資料為評估基準。

方式：

1. 易受液化區域最大範圍評估

(1) 規模 — 最大距離準則 (magnitude-maximum distance criteria)

(2) 震度準則(intensity criteria)

2. 以過去液化資料為基礎之初步液化評估

(1) 地質及地形準則 (geologic and geomorphologic criteria)

(2) 液化嚴重性指數(liquefaction severity index, LSI)

(ii)第二級分區法(詳細分區)

特點：

1. 為費用中等，可信度較高之土壤液化分區法。

2. 較第一級分區法增列了較詳盡之地質、地形環境及過去所發生液化案例之調查，包括航空攝影、現場踏勘及拜訪工址附近之居民。

方式：

1. 地質準則 (geological criteria)

2. Youd & Perkins(1978)分區法

(iii)第三級分區法(精準分析)

特點：

1. 為費用最貴，可信度最高之土壤液化分區法。

2. 除地質及地形調查外，增加大地性質調查，如現場鑽探、實驗室試驗等，並進行電腦輔助分析。

方法：

綜合地質及地形調查成果、大地性質等資料，配合地震環境特性，整體評估大區域之液化潛能。有關液化潛能之分析方法，由簡而繁大致可分成三個層次，分述如下(蘇鼎鈞、王劍虹, 2000)：

(1)第一層次：就是經由歷年累積下來的液化案例研究所建立的半經驗公式，以安全係數是否大於 1.0 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(1985)法(Seed et al.,1985)、JRA(1996)法(日本道路橋協會，1996)、T&Y(1983)法及圓錐貫入試驗(CPT)的 Robertson & Wride(1997)法、Olsen(1997)法等方法。另外，並利用 Iwasaki et al. (1982)所定義之液化潛能指數(liquefaction potential index) LPI 來量化土層之空間液化損害程度。LPI 之定義以離散形式表示如下：

$$LPI = \sum_{i=1}^n F_i \times W_i \times H_i$$

式中

$$F_i = \begin{cases} 1 - F_{Li} & \text{for } 0 \leq F_{Li} \leq 1 \\ 0 & \text{for } F_{Li} > 1 \end{cases}$$

及

$$W_i = 10 - 0.5Z_i$$

上式中 F_{Li} 為第 i 層土層之抗液化安全係數， W_i 為權重函數，代表第 i 層土層深度對液化損害程度的影響， H_i 為第 i 層土層厚度(單位為 m)，其範圍為 $0 < Z_i < 20\text{m}$ ，而 n 為所考慮可能液化深度內有 SPT-N 值紀錄之土層層數。LPI 之值由定義可知，其範圍係由不液化土層之 0 到 20m 厚皆為易高度液化土層之 100，其與液化損害程度之關係如表一所示：

(2)第二層次：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，這種分析法常稱為總應力分析法，SHAKE 程式是一個最具代表性與歷史價值的分析方法。

(3)第三層次：也就是有效應力分析法。這種方法理論架構最嚴謹，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，在了解發生液化深度之後，亦可經由參數研究的方式評估不同的土壤改良方案的成效。

綜合前述三不同等級之液化分區方法，從最簡略、費用最低廉的第一級到可信度最高、費用較昂貴之第三級，可依工程設計需要而選擇之。第一級著重在利用一般性地質特徵，及地震液化災害統計資料，初步判斷大區域之液化潛能；第二級則輔以航照資料，進行較詳細之地質與液化關係研判，並加入液化破壞回歸期的觀念，以此法進行液化潛能之初步評估極為恰當；第三級則是針對特定工程計畫之工址進行鑽探、試驗、電腦分析等，從事詳細之液化評估、危害度計算，對重大之工程設計而言，本級是絕對需要的。

針對前述三不同等級之液化分區方法之優、缺點，本研究將藉由液化機率分析結果作為液化嚴重性及液化潛能微分區之依據。

(b)土壤液化及引致變位之機率分析

一般而言，工程實務上慣以確值法(deterministic approach)評估土壤之液化潛能，針對某一工址，直接利用地震學家經地震危害度分析所得之設計地震參數(如硬地盤最大地表加速度 PGA 及工址處可能發生之最大地震規模 M_u)計算土壤抗液化安全係數 FS，檢核其土壤液化潛能。雖然此種評估方法相當簡單，便於地震學家及大地工程師就專業領域各別作業，但因兩部分均各自考慮了適當的保守程度，因此分析所得之 FS 將變得過度保守。另外，由於地震特性及土壤性質均具有相當程度之不定性(uncertainty)，因此，合理之液化潛能評估及液化地盤敏感性分類應以機率方法(probability approach)及統計理論為基礎。在這方面，Haldar & Tang(1979)，Liao et al. (1988)等學者，曾利用一階二次矩法(First-Order Second-Moment Method, FOSM)及統計迴歸模式計算土層之液化機率。

而在 Haz-Taiwan 中，係根據影響土壤液化之重要因素，如地震因素、強震延時(以地震規模大小來表示)和地下水位等，採用下式來估計各種液化敏感類別土層在最大

地表加速度值 $PGA=a$ 時，土壤實際發生液化現象的機率 $P[L_{SC}]$ ：

$$P[L_{SC}] = \frac{P[L_{SC}|PGA=a]}{K_M K_W} P_{ml}$$

其中， $P[L_{SC}|PGA=a]$ 為地震規模 $M=7.5$ ，地下水位 $d_w=1.5m$ 時，該液化敏感類別的土壤在 $PGA=a$ 情況下發生液化的機率， K_M 與 K_W 分別為地震規模 M 不是 7.5 和地下水位 d_w 不是 1.5 公尺時之修正係數，而 P_{ml} 與土壤液化敏感類別有關，因同一敏感類別的地區由於組成複雜，地震時實際可能僅有部份區域有液化現象，因此，屬於同一敏感類別的地區，實際發生液化現象的面積與總面積的比值以 P_{ml} 表示。

事實上，液化條件機率 $P[L_{SC}|PGA=a]$ 、比值 P_{ml} ，及地震規模與地下水位之修正係數 K_M 、 K_W 皆具有場址之區域性特性，亦與地震環境(如震源機制等)息息相關，因此，該分析模式並不易使用。

另外，土壤發生液化現象後，原本鬆散的顆粒趨於緊密排列，因而產生沉陷。原本顆粒越鬆散的土壤越容易液化，因此假設地表沉陷量與液化敏感類別有關。土壤發生液化現象時，由於有效應力極小而呈流體狀態，如土壤在斜坡處將產生側移，側移量與地表震動強度及延時有關。Haz-Taiwan 假設土壤液化時引致的側移量為 PGA 與 $(PGA)_t$ (係 $M=7.5$ ， $d_w=1.5m$ 時，土壤發生液化現象之 PGA 門檻值) 之比值的函數，但不易應用。此外，關於土壤液化引致之地盤側移量，Bartlett & Youd(1995) 將地盤分為有自由表面的地表及平緩邊坡分別建議了計算公式，但其分析參數並不易決定。

此外，Ishihara 與 Yoshimine (1992) 以日本富士河砂為材料進行大量的室內動態試驗，建議了利用 SPT-N 值(可由相對密度 D_r 推得)及土層抗液化安全係數 FS 估算液化後體積應變量 v_v 的方式，將其乘以液化土層厚度，即可求得此土層液化後之沈陷量，若將各土層之沈陷量累計則得此地盤液化後之整體總沈陷量 $S(cm)$ ，相當方便。Ishihara 整理了 S 與液化損害程度之關係如表二所示。

基於以上之剖析，本研究將採用 Monte Carlo 數值模擬技術，利用 Ishihara 與

Yoshimine (1992) 所建議估計液化後地盤沉陷量之模式來考慮、分析土壤液化所引致之變位量，作為液化防災之參考。

四、土壤液化及引致變位之機率分析

(a) 邏輯迴歸法液化機率分析

邏輯迴歸模式(logistic regression model) 係在 1988 年首先為 Liao et al. (1988) 推介應用於土壤液化機率之評估，該技術已漸趨成熟。藉由邏輯轉換，液化機率可表為

$$P_L = \frac{1}{1 + \exp(-Q_L)} = \frac{1}{1 + \exp[-(b_0 + b_1 X_1 + \dots + b_m X_m)]}$$

式中 X_i 係解釋參數(explanatory variable)，包括地震力參數及土層特性參數，而 b_0 ， b_1 ， b_m 可由案例資料迴歸求得。

本研究以標準貫入試驗 $SPT-(N_1)_{60}$ 值(為將 SPT-N 值正規化至對應於 $s'_v=1 \text{ kgf/cm}^2$ 、落錘能量為理論落錘能量之 60%，詳細修正過程詳如 Youd et al.,2001) 及正規化之反復應力比 $\ln(CSRN)$ 為解釋參數，其中

$$CSR = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{s_v}{s'_v} r_d$$

$$CSRN = CSR / MSF$$

$$MSF = \left(\frac{M_w}{7.5} \right)^{-2.56}$$

式中 a_{max} =最大地表水平加速度； g =重力加速度； s_v 及 s'_v 分別為總覆土應力及有效覆土應力； r_d =應力折減因子； MSF 係依 Youd et al. (2001) 之建議，採用 MSF 可能範圍之下界值計算， M_w 為震矩規模(moment magnitude)。本研究利用所蒐集之 Youd & Noble (1997) 文獻中共 367 組案例資料及 Hwang et.al.(2002) 文獻中共 288 組九二一地震本土化液化與未液化案例資料，合計共 655 組資料，進行邏輯迴歸分析，其中 SPT 鑽桿(落錘)能量比隨土層深度之變化係採用黃富國(1996)由嘉南平原鑽孔分析而得之資料，如圖一所示。根據邏輯迴歸分析結果，求得：

$$Q_L = 10.097 - 0.245(N_1)_{60,cs} + 3.757 \ln(CSRN)$$

式中 $(N_1)_{60,cs}$ 為將含細粒料粉土之 SPT- $(N_1)_{60}$ 值，依據 Youd et al. (2001) 建議之方法，修正成對等之等值淨砂(equivalent clean-sand) N 值。該迴歸分析之 Nagelkerke $R^2=0.699$ ，成功預測液化案例比例為 89.4%(321/359)，成功預測未液化案例比例為 82.1%(243/296)，平均成功預測率達 86.1%。

若將分析結果展繪於 $CSR_N \sim (N_1)_{60,cs}$ 關係圖形上，並與 Seed 確值抗液化強度曲線 (Youd et al.,2001)(以 SPT-SI 線表示)比較，如圖二所示。由圖中發現，當 $(N_1)_{60,cs}$ 值大於 6 之後，SPT-SI 確值抗液化強度曲線約介於液化機率 $P_L = 0.3 \sim 0.5$ 之間，可見 SPT-SI 線並沒有想像中保守。若再將分析之案例資料依 Seed 法 (Youd et al.,2001) 評估其抗液化安全係數 FS ，並依下列函數形式 (Juang et al.,2002) 迴歸 P_L 與 FS 之關係

$$P_L = 1/[1+(FS/A)^B]$$

求得 $A=0.8632$ ， $B=3.7102$ ，其 $R^2=0.997$ ，其關係圖形如圖三所示。因此，只要知道抗液化安全係數 FS ，即可推得其液化機率 P_L ，或者可根據可接受之液化風險(液化機率)，決定設計時須採用多高之 FS ，相當方便。若要評估整個土層之等值液化機率，建議可採用下列之權重液化機率：

$$P_{LW} = \frac{\int_0^{20} P_L(z)W(z)dz}{\int_0^{20} W(z)dz}$$

式中權重函數 $W = 10 - 0.5z$ ， z 為所考慮土層深度(單位為 m)，其範圍為 $0 \leq z \leq 20$ m。根據 Juang et al.(2002)之研究，液化機率 P_L 與液化發生可能性之關係如表三所示。根據該表及液化機率大小，即可據以對地層進行液化潛能分類，可運用在液化微分區上。接下來，本研究就以九二一地震液化案例進行探討，了解前述邏輯迴歸分析結果及權重液化機率 P_{LW} 在實際應用上之可信度。

(b) 九二一地震液化案例探討

九二一集集大地震後，彰化員林地區發生廣泛之土壤液化震害，為研究之需，

亞新工程顧問公司(2000)在當地進行了 50 孔 SPT 試驗。此處隨機抽取液化案例(鑽孔編號 BH-35)及未液化案例(鑽孔編號 BH-32)各一孔，利用前述研究成果及 Monte Carlo 數值模擬法(黃富國，1996)，進行液化及液化後沉陷變位之機率分析。

為了解分析場址之地震環境，本研究首先進行地震危害度分析，圖四為 BH-32 及 BH-35 場址在不考慮 PGA 變異性下所得之硬地盤地震危害度曲線，對應於 475 年回歸期之 PGA 值分別為 0.38g 及 0.39g，二值相近。若考慮軟弱地盤效應，則該值約可折減 80%左右(黃富國，1996)。前述二值皆較九二一地震時，員林國小 TCU110 地震測站量測之 PGA 值 0.187g 大了約 2 倍，蓋因考慮之地震回歸期不同所致。

接著，本研究利用 BH-32 及 BH-35 二地質鑽孔資料(BH-32 地下水位 $d_w=2.0$ m，7.5m~12.0m 深度為粉質土，其餘深度主要為黏土；BH-35 地下水位 $d_w=2.3$ m，除 7.5m 深度處為黏土層外，其餘深度多為粉質砂及無塑性粉土互層)，分別進行液化潛能指數 LPI、權重液化機率 P_{LW} 及液化後地盤沉陷變位量 S 之機率分析。圖五為 LPI 之分析結果，BH-32 及 BH-35 對應於 475 年回歸期之 LPI 分別為 10.7 及 27.0，對照表一之分類，液化程度分別為「中度液化」及「嚴重液化」。圖六為 P_{LW} 之分析結果，BH-32 及 BH-35 對應於 475 年回歸期之 P_{LW} 分別為 0.645 及 0.853，對照表三之分類，液化發生之可能性分別為「液化與不液化發生機會相等」及「幾乎可確定會發生液化」。圖七為 S 之分析結果，BH-32 及 BH-35 對應於 475 年回歸期之 S 分別為 14.7cm 及 33.9cm，對照表二之分類，液化損害程度分別為「中度損害」及「廣泛損害」。由於本分析中 475 年回歸期之 PGA 值較九二一地震員林場址之 PGA 值大了二倍，所以上述三項液化損害指標皆顯示，BH-32 及 BH-35 之鑽孔場址分別對應於中等及嚴重液化損害程度。以其 PGA 大小之相對程度而言，此結果事實上與現場之未液化與液化表徵完全相符，也驗證了本研究所採用分析方法的可信度，另外，該三項指標之液化程度分類也尚稱合理。其中尤以權重液化機率尚可透過圖三 P_L 與 FS 之關係，

求得對應之抗液化安全係數 FS (此例中 BH-32 及 BH-35 之 FS 值分別為 0.75 及 0.51)，對工程設計而言，相當有意義。因此，利用本研究之分析模式及三項指標之一，根據表一~表三之分類，即可對場址進行液化微分區，該方法並可應用於 Haz-Taiwan 之液化損害評估架構，對液化防災而言，相當有幫助！

五、結論與建議

1. 本研究蒐集國內外之液化與未液化案例資料，利用邏輯迴歸模式，迴歸求得液化機率 P_L 與標準貫入試驗 $(N_1)_{60,cs}$ 及正規化反復剪應力比 CSR_N 之關係，並據以建立 P_L 與抗液化安全係數 FS 之連結橋梁，對工程設計而言，相當有助益。可在一給定(或可接受)之液化風險(機率)下，決定設計所須之抗液化安全係數，並據以採取相應之抗液化措施。
2. 本研究利用九二一地震之液化與未液化案例，利用 Monte Carlo 模擬法，分別求得液化潛能指數 LPI 、權重液化機率 P_{LW} 及液化後地盤沉陷變位量 S 之年超越機率曲線，並以 475 年回歸期之損害值與三項指標之液化損害程度分類比較，驗證了本研究所建立分析模式之可信度。因此，本研究成果將可套用於 Haz-Taiwan 液化震損評估架構，並可作為液化微分區之參考，對液化防災工作之推動將有相當助益！
3. 液化引致側移量之分析模式尚未成熟，可資參考之資料亦少，此部份有待後續繼續研究。

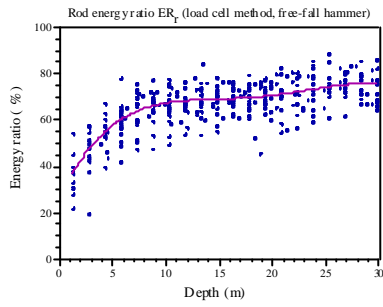
六、計畫成果自評

本研究已初步達成研究目的，惟土壤液化引致之變位目前仍以液化後之沉陷量評估較為成熟，至於側移量或流動破壞之估計，則仍有待後續繼續研究，方能使液化防災工作更加紮實！

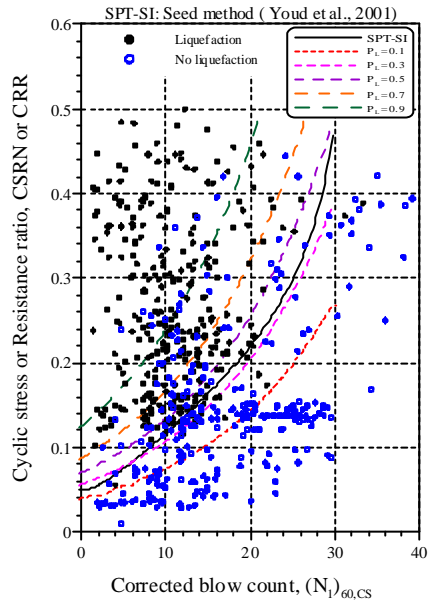
參考文獻：

- [1] Bartlett, S. F. and Youd, T. L. (1995), "Empirical Prediction of Liquefaction Induced Lateral Spread", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 4, pp. 316-359.
- [2] Elton, D. J. and Hadj-Hamou, T. (1990), "Liquefaction Potential Map for Charleston, South Carolina", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 2.
- [3] Haldar, A. and Tang, W. H. (1979), "Probabilistic Evaluation of Liquefaction Potential", ASCE, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 105, No. GT2, pp. 145-164.
- [4] Hwang, J. H. and Yang, C.W. (2001), "Verification of Critical Cyclic Strength Curve by Taiwan Chi-Chi Earthquake Data", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 21, pp. 237-257.
- [5] Iwasaki, T. et al. (1982), "Microzonation for Soil Liquefaction Potential Using Simplified Method", *Proceedings of the 3rd International Earthquake Microzonation Conference*, Seattle.
- [6] Ishihara, K. and Yasuda, S. (1991), "Microzonation for Liquefaction Potential during Earthquakes", *Proceedings of the 4th International Conference on Seismic Zonation*, Vol. 1, Stanford, California, pp. 703-724.
- [7] Ishihara, K. and Yoshimine, M. (1992). "Evaluation of Settlements in Sand Deposits Following Liquefaction During Earthquakes," *Soils and Foundations*, Vol. 32, No. 1, pp. 173-188.
- [8] ISSMFE (1993), *Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards*, Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, TC4.
- [9] Kavazanjian, E., Roth, R. A. and Heriberto Echezuria (1985), "Liquefaction Potential Mapping for San Francisco", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 1, pp. 54-76.

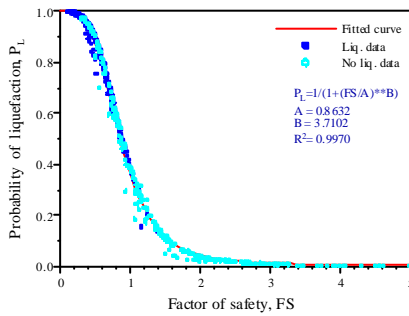
- [10] Juang, C. H., Jiang, T., and Andrus, R. D. (2002). "Assessing Probability-based Methods for Liquefaction Potential Evaluation." *J. Geotech. and Geoenviron. Engrg.*, ASCE, 128(7), 580-589.
- [11] Liao, S. S., Veneziano, D. and Whitman, R. V. (1988), "Regression Models for Evaluating Liquefaction Probability", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.114, No.4, pp.389-411.
- [12] Liu, Y. and Xie, J. F. (1984) "Seismic Liquefaction of Sand", *Earthquake Press*, China. (in Chinese)
- [13] 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.
- [14] Robertson, P. K. and Wride, C. E. (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.
- [15] Sadigh, K., Egan, J. A. and Youngs, R. R. (1986), "Specification of Ground Motion for Seismic Design of Long Period Structures", *Earthquake Notes*, Vol.57, No.1, pp.13.
- [16] Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F. and Chung, R. M. (1985), "Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.111, No.12, pp.1425-1445.
- [17] Tokimatsu, K. and Yoshimi, Y. (1983), "Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT N-value and Fines Content," *Soil and Foundations*, JSSMFE, Vol.23, No.4, pp.56-74.
- [18] Youd, T. L., and Noble, S. K. (1997). "Magnitude Scaling Factors." *Proc., NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*, Nat. Ctr. for Earthquake Engrg. Res., State Univ. of New York at Buffalo, 149-165.
- [19] Youd & Perkins (1978), "Mapping Liquefaction-Induced Ground Failure Potential", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 104, No. GT4., pp.433-446.
- [20] Youd & Perkins (1987), "Mapping of Liquefaction Severity Index", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 113, No. 11. pp.1374-1392.
- [21] Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., Dobry, R., Liam Finn, W. D., Harder, L. F., Jr., Hynes, M. E., Ishihara, K., Koester, J. P., Laio, S. S. C., Marcuson, III, W. F., Martin, G. R., Mitchell, J. K., Moriwaki, Y., Power, M. S., Robertson, P. K., Seed, R. B., Stokoe, II, K. H. (2001). "Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils." *J. Geotech. and Geoenviron. Engrg.*, ASCE, Vol.127, No 10, pp. 817-833.
- [22] 日本道路橋協會 (1996), 「道路橋示方書 同解説, V 耐震設計篇」。
- [23] 亞新工程顧問公司(2000), 「土壤液化評估與處理對策研擬第一期計劃(彰化員林鎮、大村鄉及社頭鄉)總報告」, 國科會委託。
- [24] 黃富國 (1996), 「土壤液化之危害度分析」, 國立台灣大學土木工程學研究所博士論文。
- [25] 黃富國、余明山、何政弘 (1999), "九二一集集大震土壤液化震害與問題探討", *土木工程技術*, 第 3 卷, 第 3 期, 第 47-79 頁。
- [26] 葉錦勳 (1999), 「地理資訊系統在地震災害潛勢分析與損失評估之應用」, *國家地震工程研究中心報告*, NCREE-99-035。
- [27] 蘇鼎鈞、王劍虹 (2000), "員林地區集集大地震土壤液化評估案例探討", *土工技術*, 第 81 期, 第 57~68 頁。



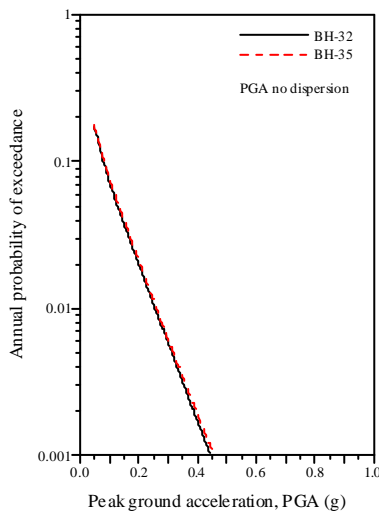
圖一 SPT 鑽桿(落錘)能量比隨土層深度之變化



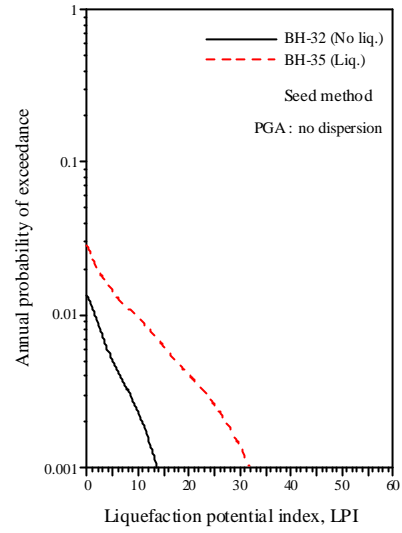
圖二 液化機率等值線與 SPT-SI 曲線之比較



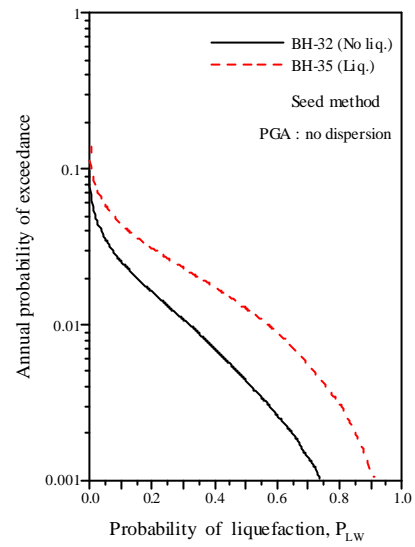
圖三 液化機率與抗液化安全係數之關係圖形



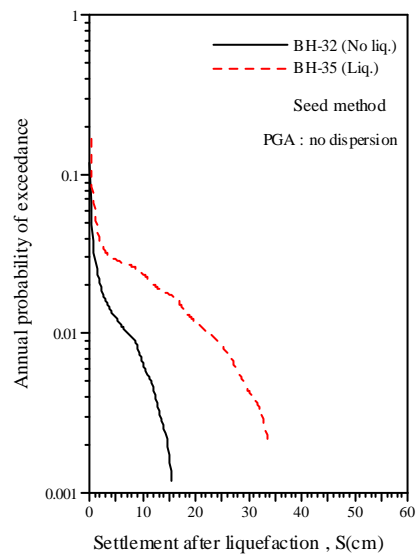
圖四 二分析場址之 PGA 地震危害度曲線



圖五 二分析場址之 LPI 年超越機率曲線



圖六 二分析場址之 P_LW 年超越機率曲線



圖七 二分析場址之 S 年超越機率曲線

表一 液化潛能指數 LPI 與液化程度之關係

液化潛能指數 LPI	液 化 程 度
0	沒有或極少液化
$0 < LPI \leq 5$	輕 微 液 化
$5 < LPI \leq 15$	中 度 液 化
$LPI > 15$	嚴 重 液 化

表二 沈陷量 S 與液化損害程度之關係

結構損害程度	沈陷量 S (cm)	地表損害程度及現象
輕至無損壞	$0 < S \leq 10$	輕到無之程度，地表有微細裂縫
中度損壞	$10 < S \leq 30$	中度損害，地表有小裂縫，砂滲出
廣泛損壞	$30 < S \leq 70$	廣泛損害，地表有大裂縫、噴砂、大位移、地盤側向移動

表三 液化可能性分類(Juang et al., 2002)

分類	液化機率 P_L	可能性描述
5	$P_L \geq 0.85$	幾乎可確定會液化
4	$0.65 \leq P_L < 0.85$	非常可能液化
3	$0.35 \leq P_L < 0.65$	液化與不液化發生機會相等
2	$0.15 \leq P_L < 0.35$	不太會液化
1	$P_L < 0.15$	幾乎可確定不會液化