

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

土壤液化引致維生管線損害之風險分析研究(II)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2211-E-032-009-

執行期間：92年08月01日至93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：楊月娥

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 10 月 28 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

土壤液化引致維生管線損害之風險分析研究(II)

Study on the Risk Analysis for Soil Liquefaction-induced Damages of Lifelines (II)

計畫編號：NSC 92-2211-E-032-009

執行期限：92年8月1日至93年7月31日

主持人：黃富國 淡江大學營建系

一、中文摘要

本研究以國內外 655 筆現場液化與不液化案例資料為基礎，利用邏輯迴歸分析及訊息理論，推導了一新的本土化 SPT-N 液化評估準則，並經由貝氏映射擬合分析求得利用抗液化安全係數 FS 評估土壤液化機率 P_L 之關係式，以及考慮整個土層損害程度之權重液化機率推求方法。據此，代表維生管線損害風險之管線災損率 RR 可很容易地求得。該模式可套用於 Haz-Taiwan 液化震損評估架構，為一本土化之經驗公式，可作為液化所引致維生管線損害之風險評估參考，對液化及維生管線防災工作之擬定相當有助益！

關鍵詞：土壤液化、維生管線、機率分析

Abstract

This paper presents a new simplified method for assessing the liquefaction resistance of soils based on the standard penetration test (SPT), and the probabilistic model for evaluating liquefaction potential and associated damages by logistic regression and the method of information theory. The new approach is developed using a database consisting of 655 field liquefaction performance cases at sites where SPT had been conducted. Based on results of above study, risk analyses for soil liquefaction-induced damages of lifelines can be evaluated in terms of repair rates. The analysis model in this research can be easily used in the frame of Haz-Taiwan software. It is beneficial to make appropriate designs against liquefaction-induced damages of lifelines.

Keywords: Soil Liquefaction, Lifelines
Probability Analysis

二、計畫緣由與目的

維生管線網路(lifeline network)在多元化的現代社會中，常扮演能源供輸、通訊聯繫等之重要角色。它包括上下水道、天然氣、電力、電信、輸油管線等等。由於此等管網結構分佈範圍相當廣闊，常達數十至數百公里，極有可能穿越斷層帶及容易發生土壤液化(soil liquefaction)等災害之地質敏感地帶。一旦發生大地震，其破壞及影響將不容忽視，九二一集集大震在中部多個縣市對維生管線所造成之震損，即為一例。斷層對管線之影響已有許多學者進行研究，本計畫則將專注於土壤液化引致之效應分析。土壤受震發生液化後，地層將喪失承载力，可能發生噴水噴砂、地基失效、側向擴展(lateral spreading)及流動破壞(flow failure)等現象(黃富國等，1999)，地盤變位越大，維生管線之損壞率也越高。管線一旦破壞，將使都市機能明顯下降，並可能引致二次災害，嚴重影響震後救災復建工作之進行。由於台灣位處歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊交接之環太平洋地震帶上，地震頻繁，都會區又多位於易發生土壤液化之沖積地盤上，因此，針對土壤液化引致之維生管線損害進行風險分析，並據以研擬適當之抗液化對策及措施，實有其必要性，並為耐震防災設計之一重要課題。另外，為了充實及更新國家地震中心之地震災害損失評估方法與應用軟體—Haz-Taiwan 之資料庫及分析參數(葉錦勳，1999)，以進行地震災害境況模擬，達致減少震損之目的，亦有迫切需要進行土壤液化對維生管線之震損影響及風險評估。

三、文獻回顧

維生管線受震反應及相關問題之研究，近年來受到世界各地學者之重視，Hamada & O'Rourke (1992)及 O'Rourke & Hamada (1992)曾分別利用日本及美國過去所發生之幾次大地震資料，針對土壤液化及維生管線之受震行為，進行廣泛而深入之案例探討，這些地震包括：1923 年 Kanto 地震、1948 年 Fukui 地震、1964 年 Niigata 地震、1983 年 Nihonkai-Chubu 地震、1990 年 Luzon 地震(以上為日本案例)；1906 年 San Francisco 地震、1971 年 San Fernando 地震、1979 年及 1981 年與 1987 年南加州 Imperial Valley 地震、1989 年 Loma Pieta 地震(以上為美國案例)。其後，1994 年美國 Northridge 地震、1995 年日本 Kobe 地震，則蒐集到更豐富之災損記錄、地震動資料，提供學者進行維生管線震損與各相關參數關係之研究，如 O'Rourke & Pease(1997)及 Toprak(1998)等。國內自九二一地震後，此方面之研究成果亦相當豐碩，如王柏蘅(2001)、洪瑞鏗(2001)、陳怡智(2001)、陳峻維(2001)、曾世賢(2001)、Tsai et al.(2000)、Shih et al.(2000)等。

綜合維生管線破壞之原因，主要可歸納為三大類：地盤破壞(ground failure)、斷層穿越(fault crossing)及地盤振動(ground shaking)(O'Rourke,1998)。地盤破壞主要肇因於土壤液化及土層滑動(如山崩)；地盤振動則屬於地震波傳之地盤受震反應，不同工址有不同的反應，其破壞肇因於波的相差(phase delay)、波幅的衰減變化、土層性質的變異性，以及人為的不連續點(如管線節點、終點)等。以上三類原因可能造成(1)地盤永久位移，引致維生管線接頭破壞及管線大變形；(2)斷層錯動造成管線破壞；(3)管線接頭相對位移超過接頭材料允許之相對位移；(4)維生線管體之應力超過材料強度。為了表示地下沉埋維生管線遭受震損破壞之程度，國內外常以災損率 RR(repair rate 或 damage rate)，即單位管線長度之管線災損點數目(repairs/km)來評估之。如果管線破壞主要是由地盤永久變位(permanent ground deformation, PGD)所造成者，如土壤液化、斷層錯動等，則利用 PGD 來建立 RR 之經驗公式；而管線破壞

如果是由地盤暫態變位(transient ground deformation)所造成者，如地盤振動，則利用最大地表速度 PGV(peak ground velocity)來建立 RR 經驗公式。因本計畫主要在探討土壤液化之效應及風險，因此，以下將接著說明維生管線災損率 RR 與液化引致之地盤永久變位 PGD 關係及其他相關地震參數之研究。

由前述相關文獻顯示，位於液化區之維生管線受損相當嚴重，很多地下沉埋結構物如自來水管、瓦斯管和地下水道等，均因土壤液化而拉裂、或壓碎、或彎曲、或上浮、或接頭破壞等，其災損模式如表一所示。

根據 Honegger and Eguchi(1992)利用美國 San Diego 自來水管線災損資料迴歸所得關係：

- 脆性材質管線

$$RR \cong \text{Prob}[\text{liq}] \times \text{PGD}^{0.56} \quad (1)$$

- 延性材質管線

$$RR \cong \text{Prob}[\text{liq}] \times \text{PGD}^{0.56} \times 0.3 \quad (2)$$

式中 PGD 之單位為 inch，而 Prob[liq] 為土壤液化之機率，前二式為美國 HAZUS 震損分析軟體(HAZUS,1997)所採用，液化機率計算所需考慮之參數有沉積物的地質年代，實際發生液化區域佔同一敏感類別區域總面積之比例、最大地表加速度、震矩規模以及地下水位深度等。

O'Rourke & Pease(1997)則利用美國 1989 年 Loma Prieta 地震時，8 個受液化影響之區域，迴歸管線災損率與震度 MMI(Modified Mercalli Intensity)之關係，如圖一所示。圖中顯示，位於液化土層大於 1m 中之管線之災損率，與震度 MMI 成一正比例之關係，即震度越大，液化區管線之災損率亦越高。

American Lifelines Alliance (2001)蒐集世界各國沉埋維生管線在不同地震情況下的破壞災損案例，利用其中 42 組主要由液化所造成的地盤破壞災損資料，不分管材及管徑進行迴歸分析，得到管線災損率 RR 與地盤永久變位 PGD 之關係如下：

$$RR = 3.0231(\text{PGD})^{0.4116} \quad (3)$$

當管材及接頭型式不同時，則利用一 K_2 係數修正之。上式中 PGD 之單位為 cm。

九二一集集大震後，Tsai et al.(2000)提出中部自來水管線之災損調查，並迴歸

求得液化區自來水管災損率 RR 與最大地表加速度 PGA(peak ground acceleration)之關係如下：

$$RR = 1.67PGA \quad (\text{管徑小於 } 50\text{mm}) \quad (4)$$

$$RR = 0.21PGA \quad (\text{管徑大於 } 50\text{mm}) \quad (5)$$

式中 PGA 之單位為 gal。惟據洪瑞鎧(2000)針對斷層通過且發生廣泛液化現象之霧峰鄉自來水管線震害成因分析，發現最大災損率幾乎發生於液化區域附近，因此可判定土壤液化對霧峰鄉自來水災損有相當大的影響。但由於該區震度亦大，且霧峰鄉內部地質鑽探資料缺乏，故無法詳細判定地盤永久變位 PGD 對災損之影響程度。另據中央大學土木系(2001)對集集地震後維生管線災損率之分析及探討指出，沖積土層的災損率較其他土層為高，且易發生液化區域之維生管線災損率將較不會液化的區域多出 5 倍，值得注意。

綜合前述各文獻有關維生管線災損率與土壤液化引致之地盤永久變位 PGD 關係，或與液化區地震動參數 MMI 或 PGA 等之關係，由於各學者據以分析之資料庫各異，因此所得結果具有明顯差異，而根據集集地震震損資料所作之分析雖已有部分成果，但深度及廣度則仍有改善之空間，亟待蒐集更完整資料，進行更深入而詳實之研究，以提供本土化地震防災之應用。在本研究中，因希望所得成果能提供 Haz-Taiwan 震損評估軟體使用，而該架構係參考美國 HAZUS 軟體，因此以下將以式(1)及式(2)來評估維生管線損害之風險。

四、維生管線損害之風險分析

利用式(1)及式(2)來評估維生管線損害之風險時，首須求取所考慮場址在設計地震作用下，發生土壤液化之機率 Prob[liq] 以及液化引致之地盤永久變位 PGD。關於 PGD 之估計，以往之研究主要以案例資料之迴歸分析為主，目前較實用之經驗公式為 Hamada 模式，Hamada et al.(1986) 在 Noshiro 市對 1983 年 Nihonkai-Chubu 地震調查中首次發現地震液化引致之地面大位移對全市房屋、維生管線產生嚴重破壞，於是再廣為蒐集日本和美國之地震調查資料，應用數理統計方法，迴歸求得估算 PGD 之經驗公式：

$$PGD = 0.75 \sqrt{H^3 \theta} \quad (6)$$

式中 PGD 為水平變位量(m)，H 為液化層厚度(m)， θ 為地面坡度或液化層底部坡度二者中之較大者(°)。

在土壤液化機率 Prob[liq](以下以 P_L 表示)之推估方面，則為本研究之重點。為了能有一個本土化之液化機率評估模式，本研究利用國內外現場土壤液化與不液化案例資料共 655 筆，對 Seed 法，T-Y 法及 NJRA 法等三常用確值、簡化液化評估法(黃富國等，1999)進行對應參數形式(簡稱 Seed 形式，T-Y 形式及 NJRA 形式)之邏輯迴歸分析，以及液化機率 P_L 與抗液化安全係數 FS 關係之邏輯映射與貝式映射推估。並利用訊息理論建立以三形式液化機率等值線之權重結果為基礎之本土化液化評估準則，以及對應之 FS 與 P_L 映射關係。本研究所採用之現場液化與否案例資料包括兩部份。一部份為 Youd & Noble(1997)所蒐集之 367 筆世界各國資料，另一部份則為 Hwang & Yang(2001)所蒐集之 288 組九二一地震本土化案例。根據所蒐集、彙整之國內外現場液化調查資料庫，本研究利用 Seed 法、T-Y 法、NJRA 法中最重要之兩個特性參數，即 SPT-N 值及反復剪應力比 CSR 為解釋變數，進行邏輯迴歸分析。邏輯迴歸分析結果如圖二~圖四所示。接著，以圖中具最大綜合預測成功率(抗液化強度 CRR 曲線上方預測液化成功案例數與曲線下方預測不液化成功案例數之和佔總案例數之比例)之 P_L 等值線(圖五)作為液化評估準則之 CRR 曲線，根據訊息理論(Theil, 1972)，Seed 形式、T-Y 形式及 NJRA 形式之正規化不確定性折減量分別為 0.4671、0.4426 及 0.3897，以此為權重值，亦即三形式之相對權重 $W_{Seed} = 35.9\%$ ， $W_{T-Y} = 34.1\%$ ， $W_{NJRA} = 30.0\%$ ，其和為 100%，則任一 SPT-N 值所對應之權重 CRR 值(CRR_w)為：

$$CRR_w = 0.0623 \exp \left[\frac{(N_1)_{60,cs}}{17.2559} \right] \quad (7)$$

上式為一非常簡單之二係數指數函數，其關係圖形如圖五所示。

接著，為了解液化機率 P_L 與此新建立準則(簡稱 MaxSRP 法)抗液化安全係數 FS 之關係，本研究同樣利用案例資料進行了

下式之貝氏映射擬合分析(Juang et al., 2002)：

$$P_L = 1/(1+(FS/A)^B) \quad (8)$$

其結果如圖六所示，係數 $A=0.8073$ 、 $B=4.4335$ ， $R^2=0.9934$ ，擬合結果很好，圖中同時展繪 Seed 法、T-Y 法及 NJRA 法之貝氏映射結果以資對比。根據式(8)即可很容易地利用傳統確值抗液化安全係數 FS 評估土壤之液化機率 P_L ，而整個土層之權重液化機率則可以下式推求：

$$P_{LW} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{Li} W_i H_i}{\sum_{i=1}^n W_i H_i} \quad (9)$$

其中

$$W_i = 10 - 0.5 z_i$$

式中 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）， z_i 為所考慮之土層深度（單位為 m），其範圍為 $0 \leq z_i \leq 20m$ ，而 n 為所考慮深度範圍內之土層層數。

利用式(9)求得所考慮場址在設計地震作用下之液化機率後，即可代入式(1)及式(2)求得脆性及延性材質管線之災損率 RR，亦即維生管線受震之風險。而 Haz-Taiwan 地震災損評估軟體也有了一本土化之經驗公式可供遵循，以進行地震災害境況模擬，達致減少震損之目的。

五、結論與建議

1. 本研究以國內外 655 筆現場液化與不液化案例資料為基礎，利用邏輯迴歸分析及訊息理論，推導了一新的本土化 SPT-N 液化評估準則，並經由貝氏映射擬合分析求得利用抗液化安全係數 FS 評估土壤液化機率 P_L 之關係式，以及考慮整個土層損害程度之權重液化機率推求方法。據此，代表維生管線損害風險之管線災損率 RR 可很容易地求得，Haz-Taiwan 地震災損評估軟體也有了一本土化之經驗公式可供遵循。
2. 液化引致之地盤永久變位 PGD 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

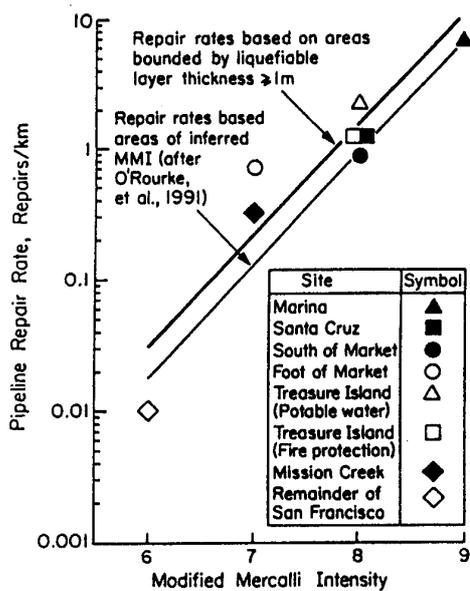
本研究已初步達成研究目的，惟土壤液化引致之地盤永久變位 PGD 之分析模式尚未成熟，仍有待後續繼續研究，方能使液化所引致維生管線損害之風險評估工作更加切合實際需求！

參考文獻：

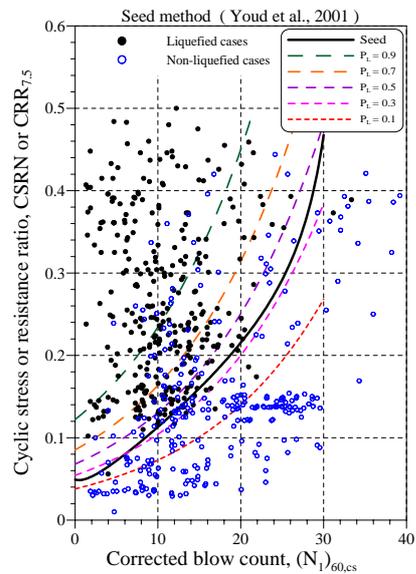
- [1] American Lifelines Alliance (2001), "Seismic Fragility Formulations for Water Systems", Part1 and Part2.
- [2] Hamada, M. and O'Rourke, T. D. (1992), "Case Studies of Liquefaction and Lifeline Performance During Past Earthquakes", Volume 1, Japanese Case Studies, *Technical Rpt. NCEER-92-01*.
- [3] Hamada, M., Yasuda, S., Tokida, K. et al. (1986), "Observation of Permanent Displacements Induced By Soil Liquefaction", *Proc. JSCE, Japanese*, 376/111-6, pp.211-220.
- [4] HAZUS(1997), *Earthquake Loss Estimation Methodology*, National Institute of Building Sciences, Prepared by Risk Management Solutions, CA.
- [5] Hongger, D. G. and Eguchi, R. T. (1992), "Determination of Relative Vulnerabilities to Seismic Damage for San Diego County Water Authority (SDCWA) Water Transmission Pipelines".
- [6] 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, Issue 3, pp. 237-257.
- [7] Juang, C. H., Jiang, T., and Andrus, R. D. (2002), "Assessing Probability-based Methods for Liquefaction Potential Evaluation," *J. Geotech. and Geoenviron. Engrg.*, ASCE, Vol.128, No7, pp. 580-589

- [8] Newmark, N. M. and Hall, W. J. (1975), "Pipeline Design to Resist Large Fault Displacement." *Proceedings of U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Ann Arbor, MI, USA, pp.416-425.
- [9] O'Rourke, T. D. and Hamada, M. (1992), "Case Studies of Liquefaction and Lifeline Performance During Past Earthquakes", Volume2, United States Case Studies, *Technical Report NCEER-92-0001*.
- [10] O'Rourke, T. D. and Pease, J. W. (1997), "Mapping Liquefiable Layer Thickness for Seismic Hazard Assessment", *ASCE, Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.123, No.1, pp.46-55.
- [11] O'Rourke, T. D. (1998), "An Overview of Geotechnical and Lifeline Earthquake Engineering", *ASCE, Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III*, No.75, Vol.2, pp.1392-1426.
- [12] PHRI(1997), *Handbook on Liquefaction Remediation of Reclaimed Land*, Port and Harbour Research Institute, Ministry of Transport, Japan.
- [13] Shih, B. -J., Chen, W. W., Wang, P. -H., Chen, Y. -C. and Liu, S. -Y. (2000), "Water System and Natural Gas Pipeline Damages in the Ji-Ji Earthquake – Calculating Repair Rates", *Proceedings of the Taiwan-Japan Workshop on Lifeline Performance and Disaster Mitigation during Recent Big Earthquakes in Taiwan and Japan*, June 29-30, Taiwan, pp.63-72.
- [14] Tasi, J.S., Jou, L.D. and Lin, S.H. (2000), "Damage to Buried Water Supply Pipelines in the Chi-Chi Taiwan Earthquake and a Preliminary Evaluation of Seismic Resistance of Pipe Joints", *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, Vol.23, No.4, pp.395-408.
- [15] Theil, H., *Statistical Decomposition*, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, London (1972)
- [16] Toprak, S. (1998), "Earthquake Effects on Buried Lifelines Systems", *Ph.D. Dissertation*, Cornell University.
- [17] Towhata, I., Sasaki, Y., Tokida, K. I., Matsumoto, H., Tamari, Y. and Yamada, K. (1992), "Prediction of Permanent Displacement of Liquefied Ground by Means of Minimum Energy Principle," *Soils and Foundations*, Vol.32, No.3, pp.97-116.
- [18] Wang, L. R. (1980), "Static and Quasi-Static Seismic Analysis of Underground Pipeline Systems," *Technical Report (SUBDUPS Project) No. 11*, Department of Civil Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute.
- [19] 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, pp.149-165.
- [20] 王柏蘅 (2001), 「集集大地震中埔里鎮之自來水管線災損分析」, 國立台北科技大學土木與防災研究所碩士論文。
- [21] 王慶明 (1987), 「埋管通過土壤液化區之非線性動態反應」, 國立台灣工業技術學院工程技術研究所碩士論文。
- [22] 中央大學土木系 (2001), 地下維生線系統耐震及改善之研究。
- [23] 洪瑞鎧 (2001), 「921 集集地震霧峰鄉自來水管線震害成因分析」, 國立台北科技大學土木與防災研究所碩士論文。

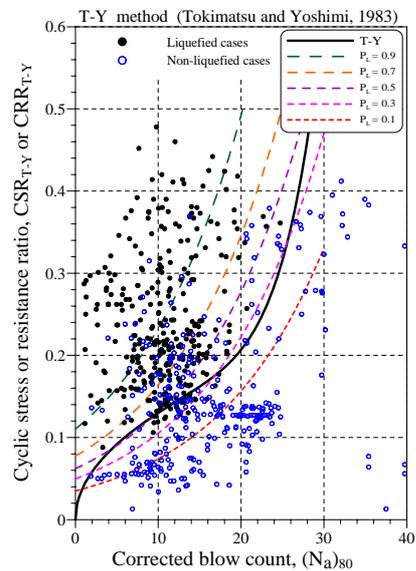
- [24] 莊志禹 (1999), 「地下油管耐震設計」, 國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文。
- [25] 黃富國、余明山、何政弘 (1999), “九二一集集大震土壤液化震害與問題探討”, 土木工程技術, 第3卷, 第3期, 第47-79頁。
- [26] 黃富國 (1996), 「土壤液化之危害度分析」, 國立台灣大學土木工程學研究所博士論文。
- [27] 陳怡智 (2001), 「921地震對台中市天然氣管線之影響」, 國立台北科技大學土木與防災研究所碩士論文。
- [28] 陳峻維 (2001), 「集集大地震中東勢、石岡、豐原之天然氣管線災損害分析」, 國立台北科技大學土木與防災研究所碩士論文。
- [29] 曾世賢 (2001), 「921集集地震污水管線災損之GIS震害分析」, 國立台北科技大學土木與防災研究所碩士論文。
- [30] 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。



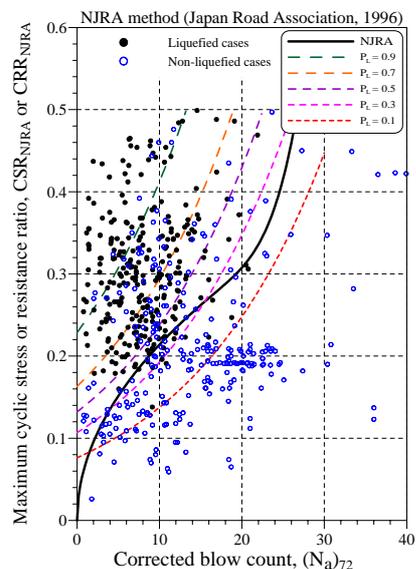
圖一 液化區管線災損率與 MMI 之關係 (摘自 O'Rourke & Pease, 1997)



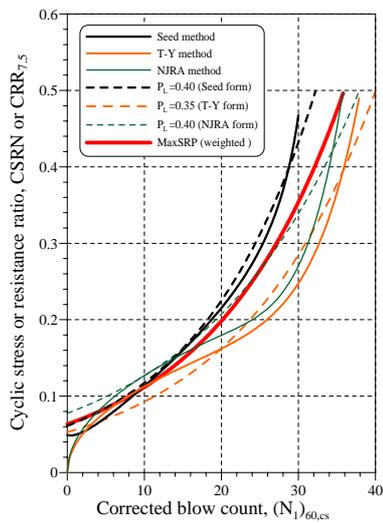
圖二 Seed 形式之邏輯迴歸分析結果



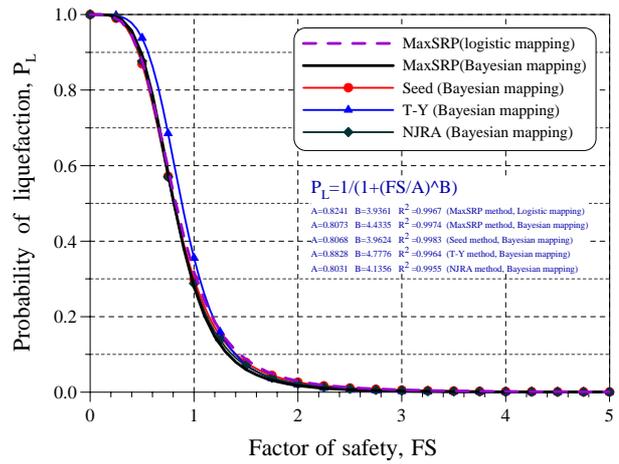
圖三 T-Y 形式之邏輯迴歸分析結果



圖四 NJRA 形式之邏輯迴歸分析結果



圖五 以最大綜合預測成功率為基準之權重 CRR 曲線



圖六 MaxSRP 法與其他液化評估準則 FS 之貝氏映射 P_L 值比較

表一 液化區維生管線災損模式示意圖 (摘自 PHRI, 1997)

破壞模式	圖示	破壞原因	解說
預埋管的破裂及彎曲破壞	<p>地表面 預埋管 液化層 非液化層</p>	地下土壤在液化層與非液化層間過度位移。	土壤發生部分液化或液化層厚度的改變。
	<p>地表面 地盤永久位移方向 預埋管 液化層</p>	地盤永久位移造成之過度外力。	因地盤之不規則分布而造成永久位移。
預埋管的上舉破壞	<p>地表面 液化層</p>	由於超額孔隙水壓之激發，導致上舉壓力增加。	液化土壤的統體單位重較其所圍繞之預埋結構大。

