



HBF、NJRA、SEED、T&Y 等 四種土壤液化分析方法應用於 臺北市之比較及探討

彭振聲／臺北市政府工務局 局長

曾俊傑／臺北市政府工務局土木建築科 科長

蕭秋安／台灣世曦工程顧問股份有限公司大地工程部 經理

廖繼仁／台灣世曦工程顧問股份有限公司大地工程部 計畫經理

趙慶宇／台灣世曦工程顧問股份有限公司大地工程部 工程師

目前國內廣為採用之 SPT-N 土壤液化分析方法包括：本國雙曲線函數法 (HBF, 2012)、日本 T&Y 法 (1983)、日本道路協會法 (NJRA1996)、美國 NCEER 法 (1997)。本文主要說明臺北市政府「106 年臺北市土壤液化潛勢圖製作暨地質鑽探補充調查專業服務工作」之計畫成果，並針對上述四種土壤液化分析方法進行比較探討。

前言

鑒於美濃地震在臺南市造成嚴重液化災情，為能進一步瞭解居住環境之土壤液化潛勢並做必要之改善工程，避免強烈地震來襲時造成重大人命與財產損失，行政院於 105 年 4 月 29 日核定實施「安家固園」計畫，逐年撥付經費協助各縣市政府進行老舊建築物耐震評估補強及土壤液化潛勢區改善防治等工作。

臺北市為臺灣首善之區，人口密集且工商業發達，政府相關單位陸續於臺北都會區推動許多重大交通建設與基礎設施，以建構國際化之都市水準。由於臺北市地質環境特殊，瞭解地震發生時可能導致土壤液化相關災害有其必要，臺北市政府陸續辦理諸多相關研究計畫，包括配合國家災害防救科技中心之大臺北地區規模地震衝擊情境之災害潛勢與建物人員災損分析等，也曾有小精度、小比例尺的土壤液化潛勢圖之產出，並於 105 年 9 月 10 日率先全國公開中級土壤液化潛勢圖。為求更新與精進圖資，臺北市政府在

「安家固園」經費的支持下執行「106 年臺北市土壤液化潛勢圖製作暨地質鑽探補充調查專業服務工作」計畫，除了廣泛蒐集整理既有地質鑽探資料，更針對既有資料不足區域進行補充地質鑽探作業，以製作精度更高的中級土壤液化潛勢圖。

土壤液化之成因

土壤液化的發生必須同時具備三個要素：低塑性土壤（砂土或粉土）、高地下水位（飽和狀態土層）以及足夠強烈之地震力，一般發生在河岸、海岸、舊河道、沖積平原及海埔新生地等區域。當排列鬆散且孔隙中充滿水的砂質土層受到地震激烈搖晃，土壤顆粒排列將趨於緊密而擠壓孔隙，使得孔隙水壓增高、砂粒間的接觸力減少甚至消失，砂與水混合成如泥漿般的流動體，失去支承上部結構物的能力，嚴重將導致結構物下陷或傾斜、人孔上浮、地下管道破裂等災損，如圖 1 所示。

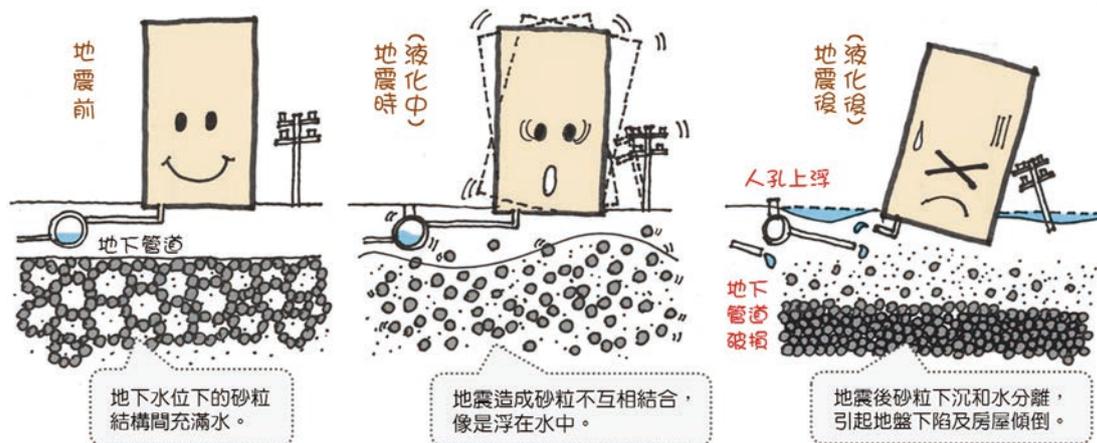


圖 1 砂土顆粒結構於液化過程之改變

另外，土壤液化亦經常伴隨噴砂現象。液化發生時，淺層砂土可能受到過高孔隙水壓驅使而衝破上方覆蓋土層，夾帶大量懸浮砂粒溢出地表，並在噴砂孔附近形成圓錐狀堆積；噴砂型式受地層條件影響，視覆蓋土層厚度及透水性而不同，有些噴砂孔甚至會形成直徑數十公分之凹陷大洞。土壤液化不一定伴隨發生噴砂現象，但有噴砂現象則表示下方土層必曾經發生液化。

土壤液化分析方法探討

現地土壤於地震作用下是否發生液化現象，多以地震引致之反覆剪應力比 (Cyclic Stress Ratio, CSR) 相較於土壤抗液化強度比 (Cyclic Resistance Ratio,

CRR)，定義抗液化安全係數 FL (= CRR/CSR)，當 $FL \leq 1$ 時即視為土壤發生液化。

本計畫目標為製作大區域中級土壤液化潛勢圖資，土壤液化潛勢評估採用國內試驗資料最豐富之現地試驗 SPT-N 法。目前廣為採用之 SPT-N 土壤液化評估法包括：本國雙曲線函數法 (HBF, 2017)、日本 T&Y 法 (1983)、日本道路協會法 (JRA, 1996)、美國 NCEER 法 (1997)，彙整比較詳表 1 及圖 2 所示。依內政部營建署安家固園計畫所建議，本計畫採用 HBF 法進行液化潛勢分析，此方法具有分析公式簡單、參數具明確物理意義、預測精度佳等優點，另外並提供其他方法之分析結果以利比對。

表 1 SPT-N 土壤液化評估法彙整表

分析方法		HBF (2017)	T-Y (1983)	NJRA (1996)	NCEER (1997)
研究背景 / 案例來源		臺灣及世界地震案例 (參考 Seed 法)	日本地震案例	日本地震案例 (1995 年阪神地震後修正)	世界地震規模 7.5 案例 (改自 Seed 法)
地震反覆剪應力比 CSR	地震反覆剪應力	平均反覆剪應力	平均反覆剪應力	最大反覆剪應力	平均反覆剪應力
	地震規模	—	修正 0.1 (M-1)	—	—
	深度應力折減	修正 (折線回歸)	修正 1-0.015z	同 T&Y 法	修正 (多項式回歸)
土壤抗液化強度比 CRR	地震規模	MSF 修正 $(M_w/7.5)^{-1.8}$	—	—	MSF 修正 $10^{2.24}/M^{2.56}$
	鑽桿能量 ER	60%	80%	72%	60%
	有效覆土應力	$\sqrt{Pa/\sigma_v'}$	$\frac{1.7N}{1 + \sigma_v'}$	$\frac{1.7N}{1 + \sigma_v'}$	$\sqrt{Pa/\sigma_v'}$
	細粒料 FC (%)	修正 $k_s \times (N_1)_{60}$	修正 $N_a = N_1 + \Delta N_f$	修正 $N_a = c_1 N_1 + c_2$	修正 $(N_1)_{60CS} = \alpha + \beta (N_1)_{60}$

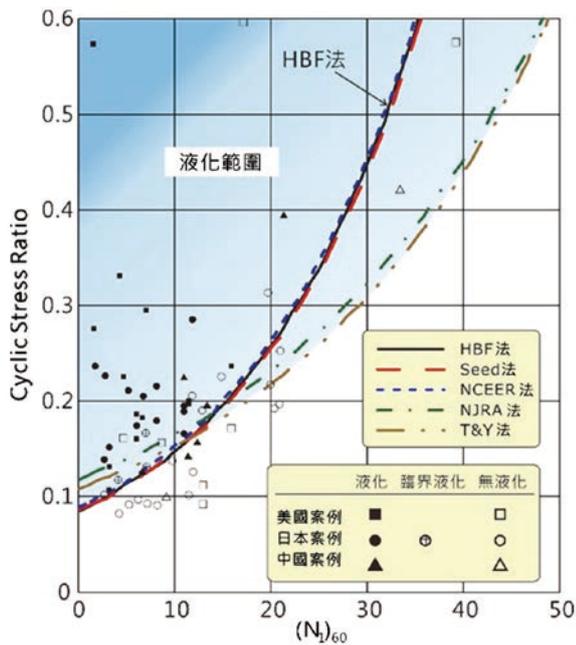


圖 2 SPT-N 土壤液化評估法之臨界液化強度曲線比較圖 (改自黃俊鴻等人, 2012)

106 年臺北市「安家固園」計畫成果及比較

臺北市地理、水文基本概述

臺北市總面積約 271.8 km²，其中平原與山區各約占 43% 及 57%，平原區主要位於臺北盆地中淡水河與新店溪以東部分，盆地北緣由大屯火山群所屏障，以安山岩熔岩與火山角礫岩不整合覆蓋於中新世地層上；盆地南側則為西部麓山帶，由第三系沉積岩地層所構成的。臺北盆地大致順著大漢溪由西南向西北傾斜，平均高度 7.95 m，平均坡度 1.81%。臺北市區平緩區面積約 120 km²，平均高度 5.78 m，平均坡度 1.95%。

參考中央地質調查所的流域地質圖，本計畫工址出露地層主要為松山層，為全新世之現代沖積層，以砂土、黏土、粉土交互出現構成，由於緊臨河道，因此土層之側向變異較大，變化快速。松山層的泥層強度普遍較低，本身不透水且含水量高，易發生變形，砂層的強度則略高，由於屬河道造成之堆積物，因此經常呈現被泥層包圍之凸鏡狀，易產生局部受壓水層，若位於淺層，較易發生液化與變形。

補充地質鑽探需求評估與配置規劃

根據招標文件需求，本期圖資整合前期圖資精度不足區，以精度不足區搭配地質分區所設定的鑽孔密度為標的初步佈設，並綜合考量以下因素進一步配置鑽孔，

包括：(1) 既有鑽孔資料整合，參考既有鑽孔分佈之特性；(2) 人口密集區及老舊建物聚落；(3) 初級土壤液化潛勢地圖之中高潛勢區域；(4) 重大開發區（如社子島）。

本計畫補充鑽探共計 190 孔，遍布臺北市 12 行政區，孔深以 30 m 為原則，部份於台北盆地周邊鑽孔則在鑽入堅硬地層 1 m 後停止，鑽孔位置分布如圖 3。液化分析採用之鑽孔密度（包含既有鑽孔及本期補充鑽孔）原則達到每平方公里 4 孔，其中關渡平原及部分北投區屬未開發地區，故鑽孔密度較低，如圖 4 所示。

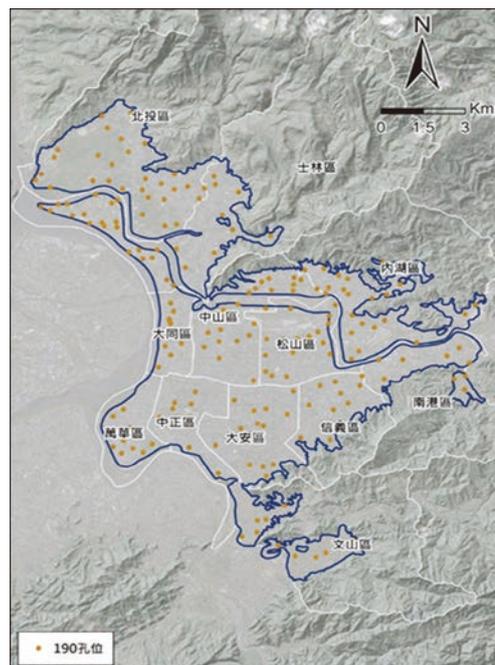


圖 3 補充鑽孔位置分布圖

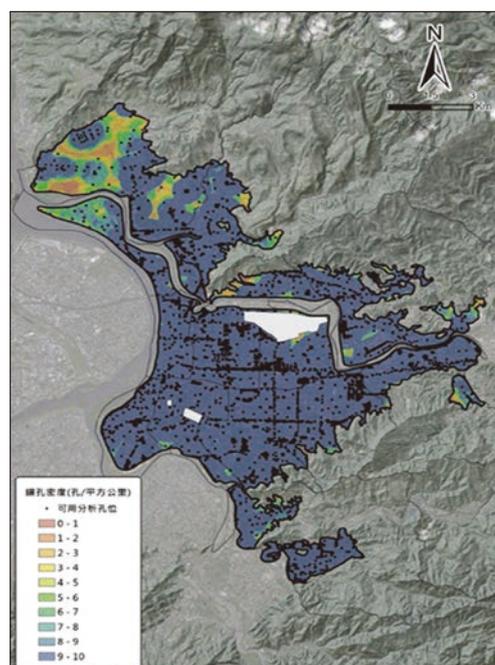


圖 4 鑽孔密度分布圖

地下水位觀測

為取得計畫範圍內之地下水位資料，本計畫由補充地質鑽探孔位挑選出均勻分布之 30 處設置自計式水位觀測井，每分鐘紀錄一筆，150 處設置人工水位觀測井，約每兩週觀測一次，整體水位觀測井布置情形如圖 5。將地下水位觀測結果平均值通過距離權重反比法 (IDW) 進行內插分析，即可推估整體分析區域內的地下水位面，如圖 6 所示。

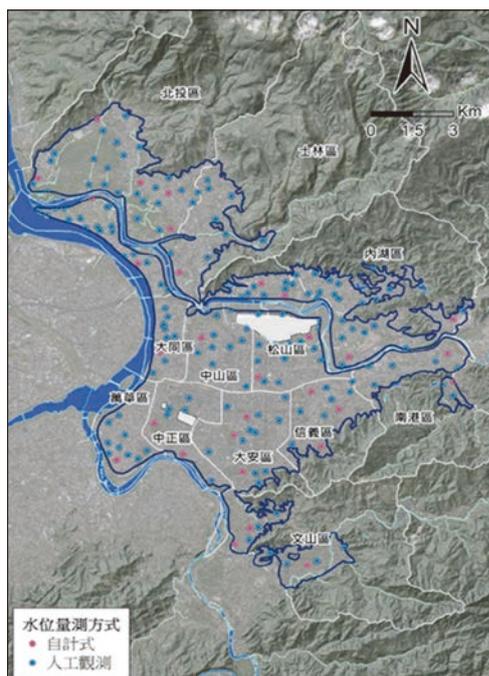


圖 5 水位觀測井分布圖

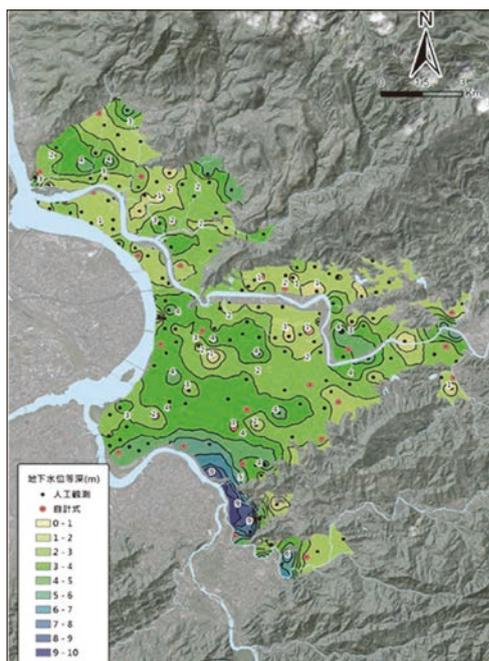


圖 6 地下水位等深度圖 (淺層)

鑽探資料蒐集與篩選

本計畫廣泛蒐集地質鑽探資料，並整理或數化建檔為 GEO2010 格式資料庫；通過自行開發的自動化篩選程式，依表 2 條件篩選、比對出符合液化分析需求的資料，實際用於分析之鑽孔總計 4769 孔，如表 3 及圖 7 所示。

表 2 鑽探資料篩選條件表

項目	條件描述
深度	鑽孔深度需 > 15m，才視為有效鑽孔參與分析
SPT-N	1. N 值須完備且間隔大致規律，若漏缺則視情況酌予修復或濾除 2. 20 公尺深度內之 N 值必須都有值，若有空值則該井錄將濾除 3. 若該井 30 公尺內最後一筆資料之 N 已大於 50，則設定該深度至 30 公尺皆以最後一筆 N 值作為代表值
FC	沒有輸入 FC 值資訊的鑽孔視情況酌予修復 (依該深度上下相同土壤分類之數值予以填補) 或濾除
γ_t	1. γ_t 範圍超乎正常區間，視情況酌予修復或濾除 2. 如 γ_t 為空值則內定 $\gamma_t = 1.8 \text{ t/m}^3$ 3. 如 $\gamma_t > 3 \text{ t/m}^3$ 者，該井錄將濾除
USCS	1. USCS 分類欄位資料型態不合、漏缺、或明顯錯誤酌予修復或濾除 2. USCS 分類欄位漏缺部分，以下列判斷式酌予修復： • IF $FC < 50$ and $N < 50$ then USCS = "SM" • IF $FC < 50$ and $N \geq 50$ then USCS = "GM" • IF $FC \geq 50$ and $PI < 7$ then USCS = "ML" • IF $FC \geq 50$ and $PI > 7$ then USCS = "CL"
PI	1. 配合 USCS 分類檢核 PI 值欄位是否合理或有漏缺 (人工判斷) 2. 檢核 PI 值未填被誤判成 0 或砂質土有高 PI 值等明顯錯誤
座標	以計畫為單位檢視該批鑽孔資料是否有 67-97 座標偏移 (人工判斷)
區位	1. 鑽孔非屬山區、臺地、水中之鑽孔 (人工判斷) 2. 由數值地形模型產製 6% 坡度圖以及 20 m 等高線，用以檢核鑽孔位置是否屬於平原區域

表 3 鑽探資料篩選結果彙整表

鑽孔來源	篩選前孔數	篩選後孔數	通過比例
本計畫補充地質調查	190 孔	190 孔	100%
最新版 GEO2010 鑽探資料庫 (含本公司近年執行中尚未歸檔之鑽探資料)	6544 孔	2656 孔	40.6%
臺北市政府提供公共工程鑽探報告 (50 案)	403 孔	315 孔	78.2%
臺北市政府工務局之營建工程資料庫	3444 孔	1550 孔	45.0%
自行蒐集整理	58 孔	58 孔	100%
合計	10639	4769	-

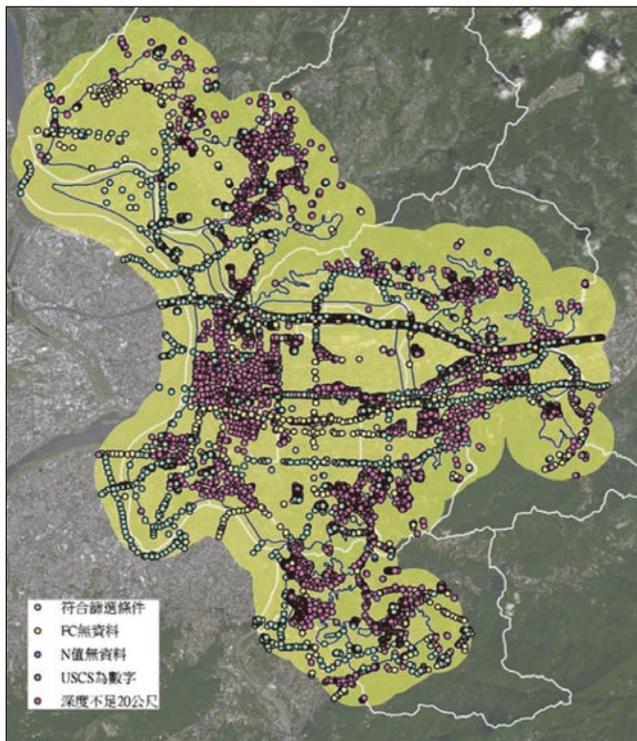


圖 7 鑽探資料篩選結果分布圖

分析地震力

臺北市主要震害多來自盆地東南方的宜蘭、花蓮外海地震，受盆地效應影響，長震動延時將使地盤共振效應顯著。依據「建築物耐震設計規範」（營建署，2011年）規定，工址應分別檢核中小地震、設計地震及最大考量地震發生時土壤液化之潛勢。土壤液化潛勢圖資採用設計地震進行評估，分析地震力參數如表 4 所示。

表 4 分析地震力參數表

分析地震力參數	中小地震	設計地震	最大考量地震
尖峰水平地表加速度 (A _{max})	0.07 g	0.24 g	0.32 g
地震矩規模 (M _w)	7.1	7.3	7.5

土壤液化潛勢地圖分析成果

將本計畫蒐集得之 4769 孔可用地質鑽探資料，套入地下水位等深度圖資以及能量修正後的 SPT-N 值，即可進行單孔的土壤液化潛能指數計算，完成各單孔液化潛能指數計算後，可利用內插分析推估各孔間「無觀測資料處」之液化潛能指數，進而繪製成土壤液化潛勢圖，常見內插分析方法如距離平方反比法

(IDW) 及克利金法 (Kriging)，考量鑽孔叢集分佈之特性，本期圖資採用 Kriging，經敏感度分析後，Kriging 的結果亦較恰當。此外，在內插分析前須進行「工程地質特性分區」，避免資料失真。本計畫液化潛勢分析結果如圖 8 所示，相關說明如下：

- (1) 大同區、中山區、士林區社子島、北投區南側及中正區部分區域位於淡水河沿岸區域，地層以砂土為主砂泥互層，地下水位深度較淺，因此本區域之土壤液化潛勢較高。
- (2) 中正區南側、大安區南側及文山區屬新店溪區，地層屬夾卵礫石層砂泥互層，且地下水位深度較深，屬土壤液化潛勢中低範圍。
- (3) 北投區北側、士林區北側、中山區北側、松山區北側、大安區東側、信義區及內湖區，地層屬泥為主砂泥互層，亦屬土壤液化潛勢較低範圍。
- (4) 其它範圍，如松山區南側及南港區沿基隆河道範圍，屬夾粉土、黏土之砂泥互層為主，屬土壤液化潛勢中高度範圍。

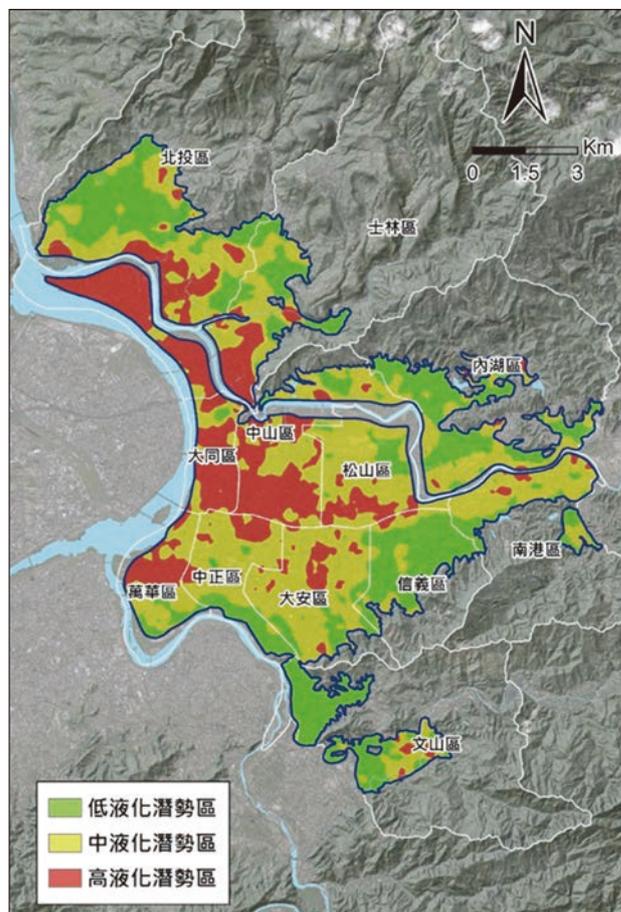


圖 8 土壤液化潛勢成果圖

不同分析方法之結果比較

本計畫為進一步探討不同分析方法之圖資產出結果，分別比較 HBF 法與 NJRA 法、Seed 法與 T&Y 法之差異，結果如圖 9 至圖 11 所示，可觀察得三種評估

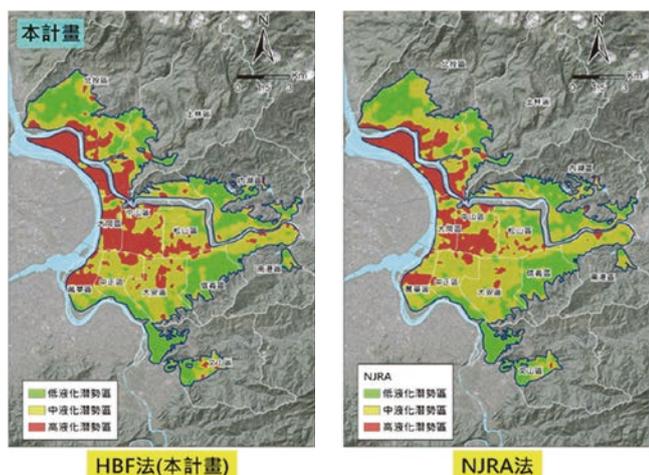


圖 9 NJRA 分析法敏感度分析成果比較圖

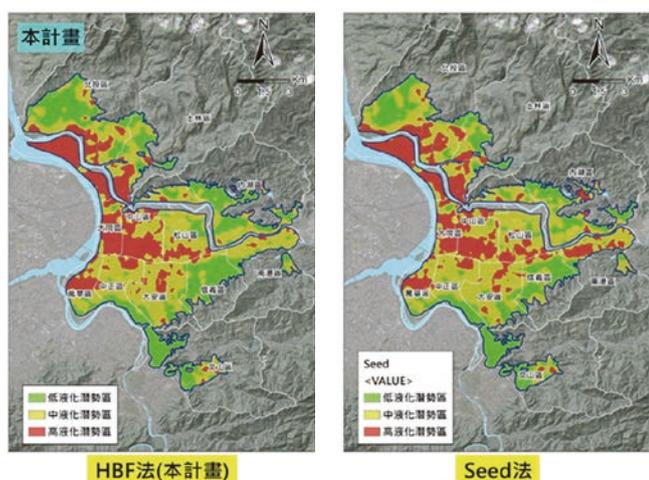


圖 10 Seed 分析法敏感度分析成果比較圖

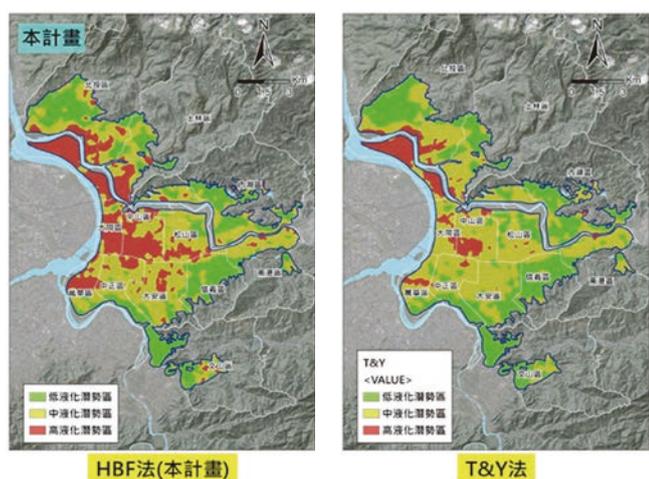


圖 11 T&Y 分析法敏感度分析成果比較圖

法中，Seed 法之中高液化潛勢面積最大，偏保守側，T&Y 法中高液化潛勢面積最小，偏不保守側，但三種評估法之液化潛勢分佈趨勢與 HBF 法大致相近。

目前常用之液化評估準則與近期國家地震工程研究中心提出的 HBF 法，或者 NJRA、NCEER、T&Y 評估法均以 SPT-N 及細粒土壤含量 FC (%) 等為評估土壤液化之主要參數。然而通過本計畫進一步探討，淡水河流域之地質分區屬於地層中細粒料含量 FC 較小、N 值較高之砂土地層，NJRA 法之土壤液化潛勢分析結果相對較為保守；而在基隆河流域範圍之地質分區屬於細粒料含量 FC 較大、N 值較低之粉砂地層，NCEER 法及 HBF 法之土壤液化潛勢分析結果相對較為保守。

結論與建議

比較過去相關研究以及本計畫分析結果，可以發現局部地區各研究與本計畫所分析結果有些許差異，經評估主要差異來源為資料精度、分析方法及分析地下水位；然而各圖資的鑽孔資料庫、液化評估方法選用以及地下水位考量方式均不相同，尚難於同一基準上進行探討比較。慶幸的是，早期地質鑽探資料蒐集及彙整不易，因此在進行土壤液化潛能分析時，僅能針對所蒐集單獨個案資料來進行；但隨著地調所近年來致力於公共工程地質探勘資料庫的建置，具參考價值的地質鑽探資料日漸增多，隨著歷次製圖採用的鑽孔數量、平均鑽孔密度增加，土壤液化潛勢分析結果將更加精確。

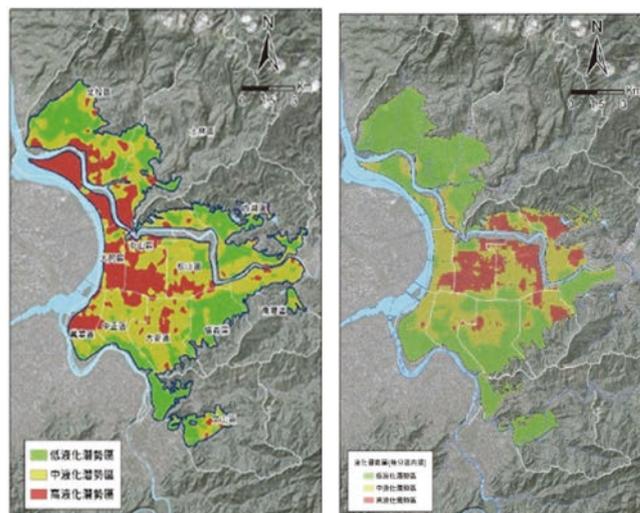


圖 12 本計畫成果圖資與初級圖資

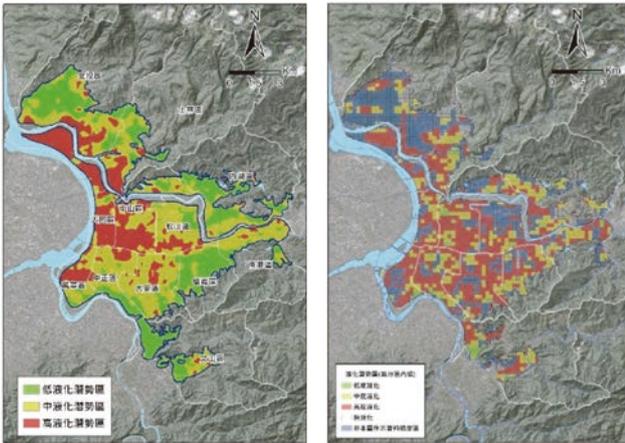


圖 13 本計畫成果圖資與臺北市前期中級圖資

參考文獻

1. Seed, H.B., Idriss, I.M. and Arango, I. (1983), "Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data," *J. of Geotech. Eng.*, ASCE, Vol. 109, No. 3, pp. 458-482.
2. Tokimatsu, K. and Y. Yoshimi (1983), "Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT-N Value and Fines Content," *Soils and Foundations*, Vol. 23, No. 4, pp. 56-74.
3. Seed, H.B., Yokimatsu, K., Harder, L.F., and Chung, R.M. (1985), "Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluation," *J. of Geot. Engr.*, ASCE, Vol. 111, No. 12, pp. 1425-1445.

4. 內政部營建署 (1974), 「建築技術規範」, 台內營字第 573693 號函。
5. 內政部營建署 (1982), 「建築技術規範」, 台內營字第 91123 號函。
6. 內政部營建署 (1989), 「建築技術規範」, 台內營字第 557769 號函。
7. 日本道路協會 (JRA) (1990), 「道路橋示方書. 同解說」, V 耐震設計篇。
8. 交通部技監室 (1995), 「公路橋梁設計耐震規範」, 交技 (84) 字第 000256 號函。
9. 日本道路協會 (JRA) 1996, 「新道路橋示方書. 同解說」, V 耐震設計篇。
10. 內政部營建署 (1997), 「建築物耐震設計規範及解說」, 台內營字第 86725 號函。
11. 內政部營建署 (1999), 「建築物耐震設計規範及解說」, 台內營字第 8878473 號函。
12. 交通部 (1999), 「鐵路橋梁耐震設計規範」, 交技 (88) 字第 06344 號函。
13. 陳銘鴻 (2002), 「土壤液化成因、災害及復健」, 國家地震工程研究中心。
14. 內政部營建署 (2011), 「建築物耐震設計規範及解說」, 台內營字第 0990810250 號函。
15. 經濟部中央地質調查所 (2011), 臺灣世曦工程顧問股份有限公司, 「三維都市防災地質資訊整合分析與建置 (2/4)」。
16. 黃俊鴻、陳正興、莊長賢 (2012), 「本土 HBF 土壤液化評估法之不確定性」, 土工技術, 第 133 期, 第 77 ~ 86 頁。

學術活動 — 高樓 TMD/TSD 設計及施工實務研討會 107.5.17

本研討會共計約 150 位學員及學生參加，介紹最新高樓阻尼技術及南山大樓施工經驗。



李建生博士



黃治政協理



王理事長親臨會場開幕致詞



甘錫滢總工程師

工程參訪 — 淡海輕軌捷運工程 @ 淡水 107.6.29

打造淡海新市鎮大眾運輸系統建設是攸關淡海新市鎮未來發展及解決淡水地區交通擁擠之重點政策，淡海輕軌預定於 107 年年底通車，目前積極試車中。本次參訪由軌道及道旁工程委員會舉辦。



溫代欣主任秘書 (右) 代表致贈紀念品予
新北市政府捷運工程局 游澄發副總工程師 (左)