

網格化土壤液化快速評估工具 — 高雄美濃地震實例分析

吳秉儒／國家災害防救科技中心助理研究員

黃明偉／國家災害防救科技中心副研究員

柯孝勳／國家災害防救科技中心副研究員

0206 高雄美濃地震造成臺南市多處民宅因為土壤液化而下陷或傾斜，引起媒體及民眾高度關注，擔心自己的住家是否位於土壤液化潛勢區內。政府在 3 月公開了八個縣市的土壤液化潛勢圖，然而仍有許多縣市的土壤液化潛勢資訊尚待揭露，需要能廣泛涵蓋全臺之評估結果。本研究建立一套網格化土壤液化快速評估方法，蒐集及處理國內相關單位建置之工程鑽孔資料，結合對應網格上之地表振動實測值進行土壤液化分析，使分析結果較能貼近實際狀況，並透過地理資訊系統以 500 m × 500 m 網格細緻呈現分析結果。研究成果已實際應用於本次高雄美濃地震，提供政府於地震災害應變分析研判之參考。

前言

臺灣平原地區約佔總面積的三分之一，人口稠密的都會區往往位於河川沖積平原地區。在河川的沖積下，地盤通常蘊含較為軟弱的砂土層或黏土層；在砂質地盤且地下水位較高的地質條件下，當遭遇較大規模的地震作用時，就有可能發生土壤液化而出現噴砂、地表沉陷或地盤側潰（Lateral spreading）等現象，使得結構物下陷、傾斜或破壞。在過去臺灣的地震災害歷史上也曾發生幾次較為明顯的土壤液化現象，例如 1946 年臺南新化地震、1964 年臺南白河地震、1999 年南投集集地震、2010 年高雄桃源地震，這次高雄美濃地震造成臺南地區明顯的土壤液化災害，使得土壤液化成為全民熱烈討論的話題，也促使政府彙整既有調查資料，旋即於 3 月 14 日公開了臺灣第一版的土壤液化潛勢圖（經濟部中央地質調查所^[1]），涵蓋了臺北市、新北市、宜蘭縣、新竹縣、新竹市、臺南市、高雄市、屏東縣等 8 個縣市。然而，仍有許多縣市境內有著豐厚的沖積土層，

亟需詳細的土壤液化潛勢資料以解答民眾的疑惑。此外，土壤液化分析所用之地表加速度，各行政區採用建築耐震設計規範所訂之 475 年回歸期設計地震力，這與實際地震地表加速度隨著震央距離增加而遞減之分布型態不同，分析結果可能與實際狀況有所差異。因此，本研究整合國內政府單位、研究機構、工程顧問公司建置之工程鑽孔資料，涵蓋臺灣大部分的平原地區，建立一套自動化土壤液化評估方法，能在地震後套用實際之地表加速度分布，快速完成土壤液化之初步分析；可提供政府在震後救災應變研判之參考，以及平時防災計畫情境模擬之應用。

工程鑽孔資料彙整及處理

現今世界各國學者所提出之土壤液化簡易評估方法中，以工程鑽孔資料取得標準貫入試驗（Standard Penetration Test, SPT）N 值為基礎的方法為最普遍。因此，工程鑽孔資料的品質、資料完整性以及是否均勻

涵蓋整個分析區域，攸關土壤液化分析結果是否能適切地呈現整個地區的實際狀況。本研究蒐集及處理目前國內各單位所建置之工程鑽孔資料庫（圖 1），包括以下幾個來源：

1. 中央地質調查所建置的工程地質探勘資料庫：為國內最為完整的工程鑽孔資料庫，其來源主要為高速公路、快速道路、捷運、下水道等公共工程興建期間所做的地質鑽探。本研究採用 Geo2010 之版本，共 15,634 孔。
2. 中央氣象局與國家地震工程研究中心合作建置之強震測站工程地質資料庫：主要是在中央氣象局的自由場強震測站場址進行地質鑽探，去除場址位於山區或卵礫石地盤者，共採用 449 孔資料。
3. 921 地震液化場址鑽探資料：921 地震之後，當時國家科學委員會（現為科技部）委託國家地震工程研究中心及國內各大學院校，分區進行土壤液化分析與研究，並於南投、霧峰、員林等土壤液化嚴重地區進行地質鑽探，本研究共取得 73 孔資料。
4. 民間建設之工程鑽孔資料：主要為富國技術工程股份有限公司所負責之工程設計案之工程鑽孔資料，共 1,496 孔，已取得 326 孔資料。

表而影響到結構物，因此 Iwasaki 等人^[3]提出定義液化潛能指數（Liquefaction Potential Index, P_L ），考慮地下 20 m 以內之影響，以深度加權法評估整個地盤的液化潛勢：

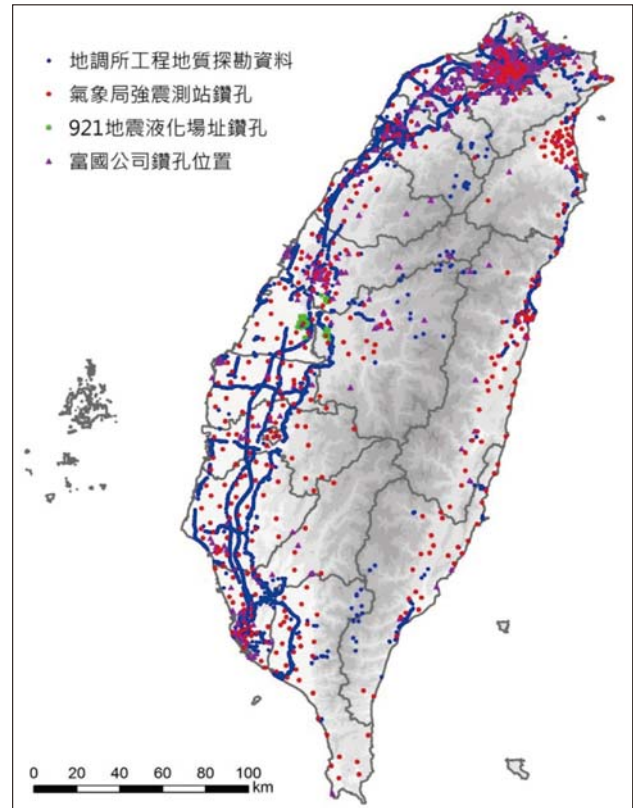


圖 1 本研究所採用之工程鑽孔資料

土壤液化分析方法

國外已有許多學者提出液化潛勢評估方法，本研究採用我國建築耐震設計規範^[2]建議之方法（圖 2），主要以工程鑽孔所進行之基本物理試驗及標準貫入試驗獲得之土壤參數推估土壤抗液化強度。定義抗液化安全係數（ F_L ）為土壤抗液化強度除以地震引致土層剪應力。當地震引致土層之剪應力大於土壤抗液化強度時，即抗液化安全係數小於 1，則達到初始液化程度。

受到土壤覆土應力的影響，在地下越深處越不容易發生土壤液化，深層土壤即使發生土壤液化也不容易發展至地

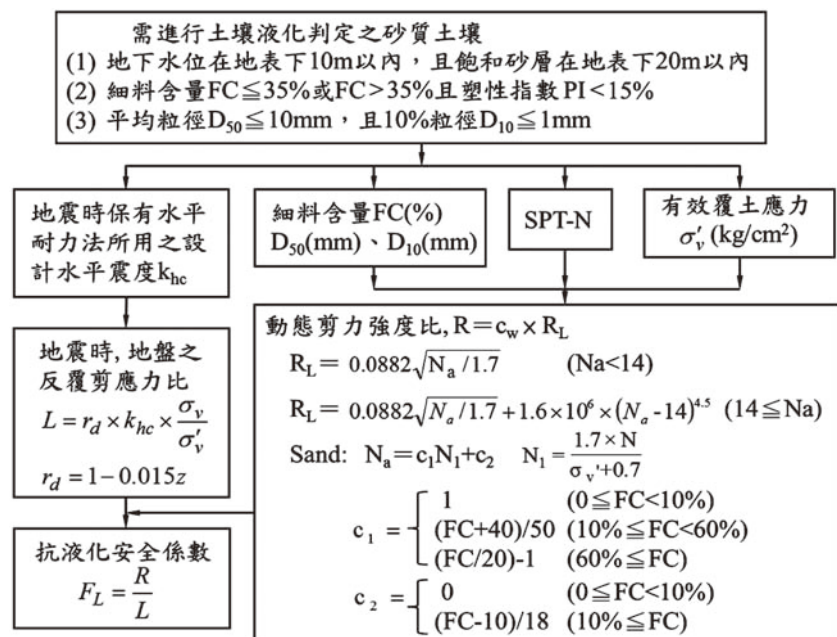


圖 2 土壤液化評估流程（內政部^[2]）

$$P_L = \int_0^{20} F \times W(z) dz \quad (1)$$

其中， $F = 1 - F_L$ ，當 $F_L \leq 1.0$

$F = 0$ ，當 $F_L > 1.0$

$W(z) = 10 - 0.5z$

F_L 為抗液化安全係數

z 為距地表之深度，單位為公尺

Iwasaki 等人^[3]分析過去 6 次地震案例，綜合 64 個液化區域和 23 個非液化區域的資料，發現 $F_L = 15$ 為大部分液化與非液化工址的主要分界線，並提出液化嚴重程度之分級方式：

$P_L = 0$ ：沒有液化或極少液化；液化風險非常低。

$0 < P_L < 5$ ：輕微液化；液化風險低。

$5 \leq P_L < 15$ ：中等液化；液化風險高。深層可能液化，但地表沉陷不明顯。

$P_L > 15$ ：嚴重液化；液化風險非常高。地表可能出現明顯液化表徵，如噴砂或顯著沉陷。

Ishihara 及 Yoshimine^[4]提出液化引致沉陷量之預估方法，Yi^[5]進一步將其所用之圖表以回歸公式表示，可由液化評估所得之抗液化安全係數 (F_L) 推估體積應變，將不同深度的體積應變量疊加得到總沉陷量。

自動化分析程序

在地震發生後，透過網際網路接收中央氣象局發布之地震訊息文字檔，包含地震規模、震央位置、各測站實測最大地表加速度 (Peak Ground Acceleration, PGA)，程式在收到地震訊息後自動啟動運算，包含產製地表振動分布圖 (以 500 m × 500 m 網格呈現)、計算各孔位之土壤液化潛能指數、及估算各孔位液化引致沉陷量 (如圖 3)。倘若一個 500 m × 500 m 網格內有多個鑽孔，則將各孔位分析結果取平均值。最後將有資料的網格做為控制點，以反距離權重法 (Inverse Distance Weighting) 進行內插運算，求得所有網格上的數值，並產製地理資訊系統圖層。

高雄美濃地震實例分析

2016 年 2 月 6 日 AM3:57 發生了震驚全臺的高雄美濃地震，除了造成 117 人死亡之外，在臺南市多處民

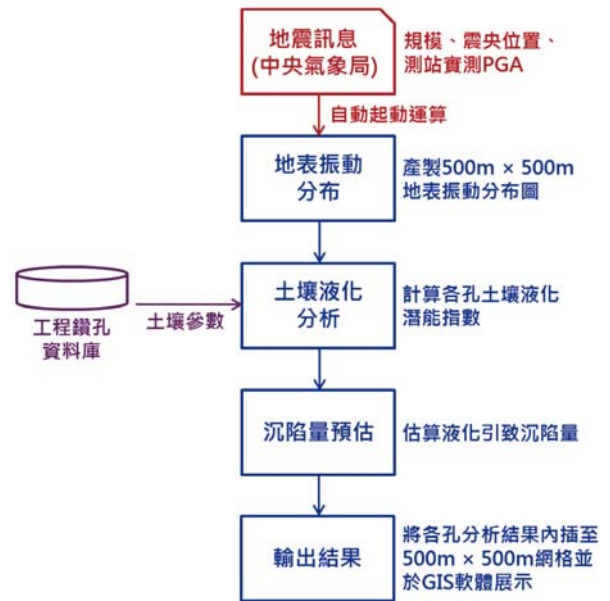


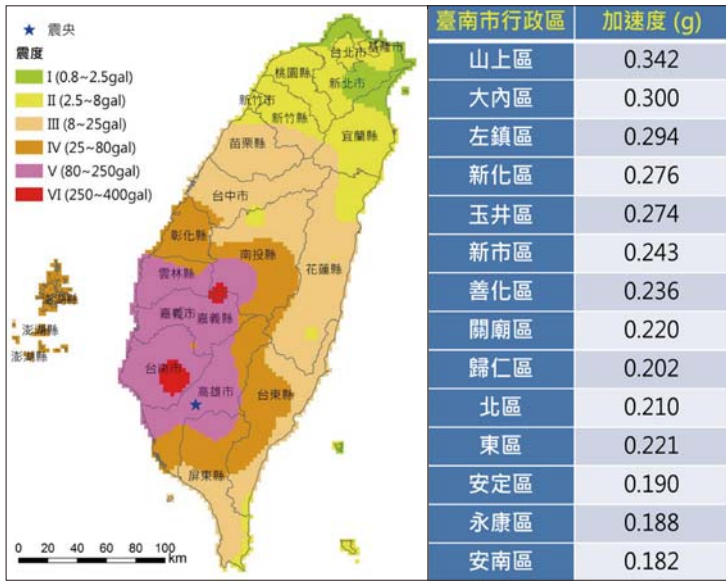
圖 3 自動化土壤液化分析程序

宅因為土壤液化而下陷或傾斜，經過政府單位的宣導及媒體的報導，使得全國民眾對於土壤液化的發生機制及可能造成之後果有更進一步的認識。本研究在震後收到中央氣象局傳送的地震訊息之後，立即啟動土壤液化自動評估模組。處理程序之特點在於使用網格化實測地表加速度，以及對應網格內之工程鑽孔資料進行土壤液化分析，使分析結果能更貼近地實際狀況。

圖 4(a) 為高雄美濃地震全臺實測地表加速度分布，可看出臺南市、以及雲林縣與嘉義縣交界處之最大震度達六級，圖 4(b) 為臺南市各行政區地表加速度平均值。離震央較近的山上區、大內區，其最大地表加速度超過 0.3 g，其他行政區之最大地表加速度則介於 0.18 g 至 0.3 g 之間。

根據中央地質調查所^[6]之地質調查報告及本中心於地震應變期間所蒐集之災情查報資料，多個行政區出現了土壤液化常見的現象 (如圖 5)，以鹽水溪沿岸最多，尤其在新市區和新化區交界處，此處過去 1946 年的臺南新化地震及 1964 年的臺南白河地震也曾發生噴砂及地盤沉陷等。而位於安南區及新市區的建物沉陷及傾斜，則是這次媒體關注的焦點。另外，位於善化區的國道三號路堤也發生側潰破壞及噴砂現象。

以本次地震實測地表加速度，結合工程鑽孔資料進行土壤液化分析。分析結果如圖 6，圖中標示土壤液化高潛勢區及中潛勢區，其中安南區出現大範圍的高



(a) 全臺地表加速度分布 (b) 臺南市各行政區地表加速度平均值

圖 4 高雄美濃地震震測地表加速度分布

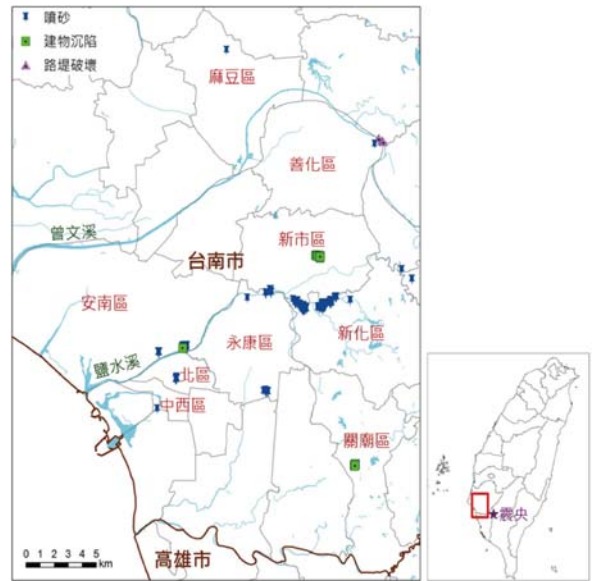


圖 5 高雄美濃地震土壤液化發生位置

液化潛勢區與中液化潛勢區；而在學甲區、七股區、下營區、麻豆區、新市區、新化區、仁德區等也存在中度液化的可能性。

土壤液化引致建物沉陷之分析結果及建物沉陷位置如圖 7，預估沉陷量嚴重地區與評估之液化潛勢中高潛勢區（圖 6）一致。本次地震土壤液化造成安南區及新市區多處建物產生明顯沉陷，其位置皆位於中液化潛勢區內，驗證建物沉陷與土壤液化潛勢具有高度相關性。根據國家地震工程研究中心^[7]之現地調查報告，安南區及新市區之建物沉陷量約為 1 m 及 45 cm，本研究之預估沉陷量分別為 30 cm 及 25 cm。推測其原因，可能是評估方法假設地盤為自由場而無建物在上方，而這些建物的基礎型態多為獨立基腳或地梁，結構物的自重加劇了沉陷量的產生。

結論與建議

本研究提出一套網格化土壤液化自動評估工具，運用國內相關單位建置之工程鑽孔資料，結合對應網格之實測地表加速度進行土壤液化分析，有別於過去整個分析區域或各行政區採用單一地表加速度的方式，使分析結果更為細緻且能貼近現地情形。經由高雄美濃地震的實例分析，土壤液化分析結果及沉陷量預估皆能適切掌握本次地震之實際狀況，研究成果已

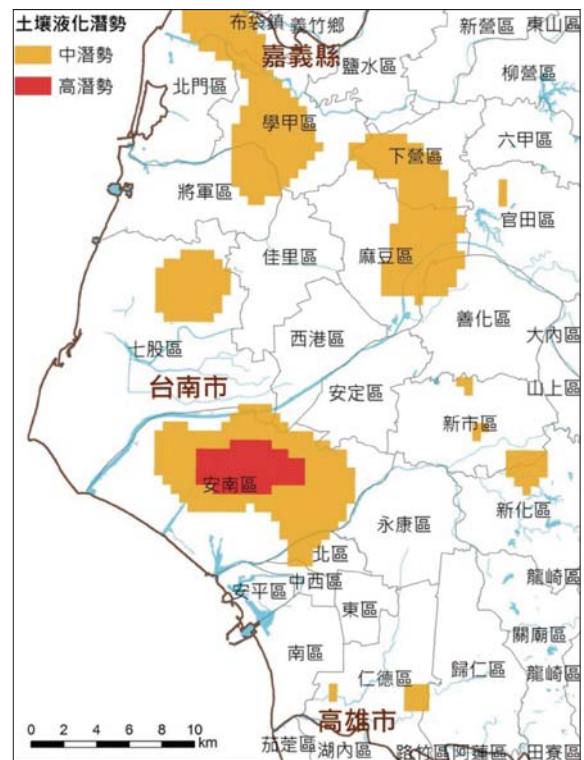


圖 6 高雄美濃地震土壤液化分析結果

實際應用於地震應變作業中。然而，倘若需要更高精度的分析資料，目前內政部正研擬相關措施，補助地方政府進行「中級」精度土壤液化潛勢地圖的調查計畫，經由政府及學術單位共同合作，建置更為完善的土壤液化潛勢圖資。

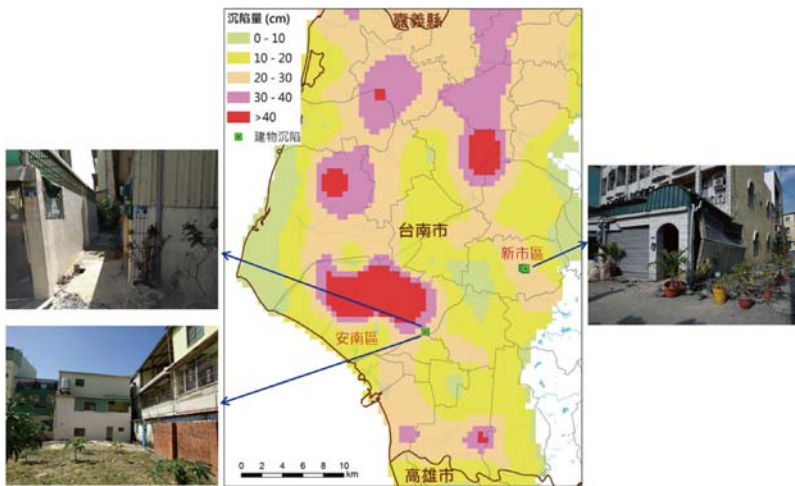


圖 7 土壤液化引致沉陷分析結果與建物沉陷位置

誌謝

感謝中央地質調查所、中央氣象局、國家地震工程研究中心、及富國技術工程股份有限公司提供工程鑽孔資料，使本研究得以順利完成。

參考文獻

1. 經濟部中央地質調查所 (2016a), 土壤液化潛勢查詢系統 (<http://www.moeacgs.gov.tw/2016.htm>)。
2. 內政部營建署 (2011), 建築物耐震設計規範及解說。
3. Iwasaki, T., Arakawa, T. and Tokida, K., (1982) "Simplified Procedures for Assessing Soil Liquefaction during Earthquakes", Proceedings of the Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Southampton, pp. 925-939.
4. Ishihara, K and Yoshimine, M. (1992), "Evaluation of Settlements in Sand Deposits Following Liquefaction during Earthquake", Soils and Foundations, Vol. 32, No. 1, pp. 173-188.
5. Yi, F. F. (2010), "Procedure to evaluate liquefaction-induced settlement based on shear wave velocity", the 9th US National and 10th Canadian Conference

on Earthquake Engineering: Reaching Beyond Borders, Toronto, Canada.

6. 經濟部中央地質調查所 (2016b), 「20160206 地震地質調查報告」。
7. 國家地震工程研究中心 (2015), 「0206 高雄美濃地震初步勘災報告」。

曾文南化烏山頭水庫治理及穩定南部地區供水計畫 南化水庫防淤隧道工程

更新·活化·永續利用

防淤隧道完工後進行排淤運轉，可減緩水庫淤積延長水庫壽命，增加水庫防洪能力、降低颱風期水庫原水濁度、補充下游河道及海岸砂源

