

■ 石瑞銓、吳毓泰、陳芷辰、許崑泉

重複發生的 土壤液化事件

土壤液化會在同一地方重複發生，
而利用震波測勘
可進一步了解地震前後土壤物理性質的變化。



在臺灣有多次歷史地震引起土壤液化現象的記載，近幾年集集大地震、甲仙地震，以及美濃地震也發生較顯著的土壤液化災害。



新化區北勢里地質圖與 1946 年、2010 年、2016 年地震的土壤液化分布。

土壤液化會不會在同一個地方重複發生，一直是很多科學與工程學家在意的問題。因為在同一個地方短時間重複發生夠大的地震不多，而且各地地質條件也不同，所以大家對這個問題就有不一樣的想法。台灣南部的新化北勢里分別在 1946 年新化地震、2010 甲仙地震，以及 2016 美濃地震時造成大面積且密集的土壤液化現象，讓我們知道土壤液化會在同一個地方重複發生。由於在 2010 甲仙地震後以及 2016 美濃地震前後都有進行震波測勘，讓我們可以用科學資料指出地震前後土壤物理性質的變化。

土壤液化

土壤液化是形容在地震發生時，地下水面以下的土壤受到應力作用而暫時失去強度，使得土壤顆粒失去支撐力而懸浮在水中，若再持續受應力作用，則可能噴出至地面

形成噴砂現象。土壤液化最早於 1918 年被用以解釋美國加州卡拉韋拉斯郡水壩的破壞現象，1964 年日本新潟及美國阿拉斯加分別發生了強烈地震，並且伴隨大規模土壤液化現象，這方面的研究開始被重視。

在臺灣有多次歷史地震引起土壤液化現象的記載，近幾年集集大地震、甲仙地震，以及美濃地震也發生較顯著的土壤液化災害，相關的研究與防災議題因此受到重視。

土壤液化發生的條件是當地土壤必須是疏鬆的細砂質土層，地下水充沛且近地表，在夠大的地震加速度使孔隙水壓快速增加，或地震歷時夠長引起動態水壓持續累積上升，便會引發液化現象。因此，容易發生液化的地點主要是舊河道、河道兩旁的沖積平原、河岸、海岸或海埔新生地等。土壤液化現象雖然不會導致人員大量傷亡，但是經常



甲仙地震和美濃地震後的土壤液化噴砂現象

造成財物損失與安全疑慮，例如房屋的傾斜或倒塌、農田的毀壞、高速鐵路橋墩下陷等，因此關於土壤液化的研究是重要的課題。

北勢里的土壤液化

新化區位於嘉南平原與新化丘陵邊界，西半部是海拔 6 公尺至 25 公尺的平原地形，東半部是海拔 25 公尺至 170 公尺的丘陵地形，地勢呈現東高西低的態勢，且區內有新化斷層通過。本文施測位置位於新化區北勢里屬於西邊地勢平坦的平原區，主要是由粉砂、黏土、砂和壤土組成的全新世沖積層，是瀉湖、三角洲、河口、海灘、淺海及風成的混合沉積環境。現地鑽井資料顯示，淺層 20 公尺內土壤厚度變化大，且可觀察到土壤顆粒變化，地下水水面約落在 1 至 2 公尺深處，豐富的地下水以及細砂土層讓這地區具液化潛能。

1946 年發生新化地震時，已觀察到新化地區有大面積的噴砂現象。2010 年 3 月 4 日高雄甲仙發生芮氏規模 6.4 地震，在台南及高雄地區的震度大多超過 5 級，局部地區更高達 6 級，在新化地震站記錄到的震度是 6 級，水平最大加速度是 325 gal。雖然這次地震的震央與北勢里相距約 50 公里，劇烈的震動造成北勢里再次發生土壤液化現象，且與 1946 年的液化區域相近。

2016 年 2 月 6 日高雄美濃發生芮氏規模 6.6 的地震，新化地區甚至出現 7 級震度的搖晃，水平最大加速度平均值是 492 gal。美濃地震震源與北勢里相距約 40 公里，再次造成北勢里發生土壤液化現象，且與 1946 年及 2010 年的液化區域相近。這 3 次地震同樣在北勢地區觀察到密集的噴砂現象，且在相同地點重複出現，顯示土壤液化會在同一地點重複發生，土壤與地質的特性值得進一步研究。

震波測勘調查

土壤液化通常利用工程方法做評估，如標準貫入試驗或圓錐貫入試驗。但是鑽探方法只提供井位處一維的資料，若要得到二維剖面資料，則需排鑽才能獲得。藉由折射震測以及多波道表面波測勘法，可以獲得二維的剖面資料。折射震測及多波道表面波測勘法分別可以提供近地表的 P 波及 S 波波速變化，以探討淺層土壤物理性質受到液化現象的影響。

調查時採用的震測儀是 1 部 GEOMETRICS 生產的 24 波道 Strata Visor NZXP 與 1 部 24 波道的 Geode，受波器是頻率 4.5Hz 的垂直受波器，震源是 16 磅大榔頭。震源採用人工敲擊的方式產生，測線長度都在 100 公尺左右，目標是深度範圍約為地表至地下 18 公尺的範圍。資料處理時，分別利用 SeisImager/2D 及 SeisImager/SW 獲得淺層 P 波資料及淺層 S 波速度資料。



震測儀、測線布線方式，以及人工利用 16 磅大榔頭敲擊的方式產生震源。

從 2011 年到 2017 年，在北勢地區共布置了 16 條測線。量測的測線主要布設在新化普賢院北邊，以及高速鐵路東側的場址，場址內的噴砂現象分布集中且數量眾多。量測時間分別在甲仙地震之後、甲仙地震與美濃地震發生之間，以及美濃地震發生後。原先計劃定期進行勘測，但是因為農田中種滿了經濟作物，調查無法以規律的時間間距進行。

2010 年甲仙地震後在北勢場址進行 7 條測線的量測（測線 BS-1 至 BS-7），在 2014 年間針對測線 BS-8 與 BS-9 進行 4 次量測，2016 年美濃地震後，針對 BS-8 至 BS-16 等 9 條測線進行 3 次量測，2017 年又就該 9 條測線進行 1 次量測。近年由於當地又種滿了經濟作物，很難安排時間持續量測。只有其中部分區域在這 4 次施測時都有進行速度構造隨時間的變化監測。此外，也把測線區分為液化範圍內外，以比較液化區及非液化區域的差異。

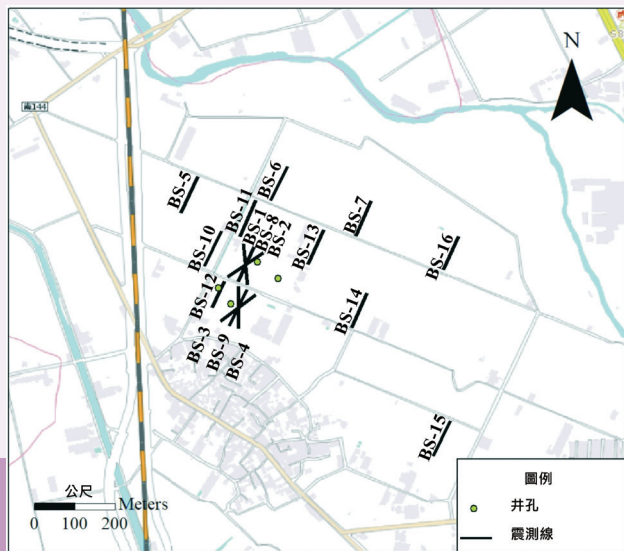
調查結果

調查的結果可以分為 3 組；第 1 組是在 2010 年甲仙地震後 1 年；第 2 組是在 2014 年甲仙地震後 3 年，也是 2016 年美濃地震的前 2 年；第 3 組是 2016 年美濃地震後所做的測量。

第 1 組測線包含了 BS-1 至 BS-7 等 7 條測線。測線 BS-1 至 BS-6 布置於發現有噴砂的農田中，BS-7 則布置在沒有發生土壤液化的區域。測線 BS-1 和 BS-2 在同一農田中交叉施測，BS-3 和 BS-4 則在另一農田中交叉布置以互相驗證。在這兩個農田中，分布廣泛的噴砂集中在兩條測線의 交會處。

根據測線 BS-1 至 BS-6 線的二維速度剖面，S 波速度剖面在噴砂區下方深度超過 5 公尺處出現低速區。S 波速度比其旁邊的速度低約 20 至 40 公尺/秒，但在沒有液化發生的測線 BS-7 則沒有低速區出現。然而，無論在液化區或非液化區內，從 BS-1

除工程方法外，震波測勘是可行的土壤液化評估方法。



詳細震測測線和鑽孔的位置圖。黑色實線代表震測線，綠色點代表井孔位置。測線 BS-1 和 BS-2 以及 BS-8 在同一塊田地，BS-3 和 BS-4 與 BS-9 在同一塊田地。

到 BS-7，P 波波速剖面中 P 波波速持續向上升高，都未看到低速區出現。

第 2 組測線以 BS-8 及 BS-9 為主。測線 BS-8 與測線 BS-1 和 BS-2 在同一個農田，因有農作物而無法交叉施測，測線 BS-9 則與 BS-3 和 BS-4 在同一地方。有趣的是，甲仙地震 3 年後，原先噴砂處底下的 S 波速度低速帶消失了。在 2014 年 1 月到 5 月間分別施測 4 次，都得到同樣的結果。P 波波速剖面則跟甲仙地震後 1 年一樣無大差異。

第 3 組測線共有 9 條 (BS-8 至 BS-16)，測線 BS-10 到 BS-12 布置在有噴砂的地區，BS-13 到 BS-16 則布置於離噴砂區較遠的農田。所有測線的 P 波波速剖面都跟之前一樣，不管是在液化區或非液化區內，P 波速度從地表逐漸地往下增高，都沒有橫向的速度異常。但是，在美濃地震之後，低速帶再次出現在 S 波波速剖面上。美濃地震前消失的低速帶在地震後又出現在液化區內的測線 BS-8 到 BS-12 中。

在液化區域外的測線，S 波波速從地表到往深處均勻增加，沒有橫向的速度異常。

比較強震後液化區域和非液化區域，最明顯的差異是 S 波速度剖面中的低速帶，其位置與地表觀察到的噴砂位置相近，筆者認為低速帶的出現與液化噴砂有關聯。無論液化區域內外的 P 波速度變化大致上相同，並無明顯對於液化或非液化區域產生的異常。

S 波剖面受土壤液化的影響並隨時間變化，S 波的波速變化可能是由於地下水對土壤顆粒的重新排列，或因水分含量的變化所致。換句話說，地震後土壤特性可能逐漸自我修復並建立抗剪強度。這些結果也告訴我們，當評估一個地方是否會產生液化的潛在性時，觀測的時間非常重要，在地震後觀測到的可能跟地震前觀測到的不同。

土壤液化會在同一個地方重複發生，地震前的土壤液化潛勢調查有其必要。除工程方法外，震波測勘是可行的土壤液化評估方法，它可提供連續的地下二維或三維的 P 波或 S 波速度剖面。雖然沒有在本文說明，但利用 P 波跟 S 波速度還可以進一步提供土壤的泊松比、剪切係數、孔隙率等，以利我們了解震前與震後土壤的物理性質變化。

石瑞鈞

中正大學地球與環境科學系

吳毓泰

美國休斯頓大學

陳芷辰

中央研究院地球科學研究所

許崑泉

台南市那拔國小