



# 多元整合空間資訊技術於 地層下陷監測與防治之應用

洪偉嘉／國立交通大學土木工程學系 兼任助理教授

陳怡安／國立中央大學地球科學系 博士候選人

黃金維／國立交通大學土木工程學系 講座教授

台灣濁水溪沖積扇（行政區域包括彰化縣與雲林縣）在地質條件上富含易壓縮土壤，加上不當過量抽用地下水，導致該區域為台灣目前最嚴重的地層下陷區，尤其高速鐵路正通過該地區最嚴重的下陷中心，地層下陷將會對高速鐵路結構安全產生影響，使得地層下陷防治成為目前一個急需解決的重要議題。

政府為改善當地嚴重地層下陷問題，大力投入相關地層下陷防治工作，本文主要介紹台灣地區應用多元整合空間資訊技術監測濁水溪沖積扇的地層下陷，其中多元整合空間資訊監測技術的監測方法包含全球定位系統（Global Positioning System, GPS）、永久性雷達干涉技術（Persistent Scatterer Interferometry, PSI）、水準測量、磁環分層式地層下陷監測井（以下簡稱地陷監測井）與地下水位井等，分別從空中、地面及地下不同面向來監測三維變形。

## 前言

由於世界人口與經濟的持續成長，人類對於水資源的需求亦不斷提昇，當地面水資源不足時將轉而使用地下水資源以彌補不足，但不當超量抽用地下水將會導致地層下陷，進而產生其他衍生性災害，如地表變形、建物傾斜或龜裂、積水不退、海水入侵與土壤鹽化等，此一問題已普遍存在於各已開發或開發中國家<sup>[1-3]</sup>，而台灣亦是其中之一。台灣西部平原地區由於經濟快速發展，水資源需求大幅增加，加上地下水取用方便，使得平原區超抽地下水的情形普遍，導致西南沿海地區嚴重的地層下陷問題，其中又以濁水溪沖積扇區域最為嚴重。

就區域地質而言，濁水溪沖積扇由濁水溪沖積而成，北起烏溪，南至北港溪，東起八卦山台地西麓和斗六丘陵，西止於台灣海峽，面積約 2,000 平方公里，

是台灣西部最重要的農業地區，同時為台灣最大沖積扇，以行政區域劃分則可分為彰化縣和雲林縣，圖 1 為濁水溪沖積扇地形分區圖。

圖 2 為濁水溪沖積扇之水文地質概念模型<sup>[4]</sup>，濁水溪最重要的地下水補注區位於東側之扇頂，以厚層礫石為主，分層並不明顯，沒有主要的阻水層（泥層），地下水上下流通並無限制。西側扇頂以外部份，深度 330 m 範圍內由上而下有四個含水層（Aquifer）及四個阻水層（Aquitard）。就地層組成材料而言，濁水溪沖積扇之扇頂部份地層主要由礫石及粗砂所構成，根據土壤力學資料，這些地層具有較高的強度及透水性，不僅可壓縮性低，也容易獲得地表水之補注，因此地層下陷的潛能較低。相反的在扇央及扇尾部份，地層沉積物顆粒越來越細，尤其到了沿海地區，地層主要由細砂及黏土構成，屬於軟弱土壤，因

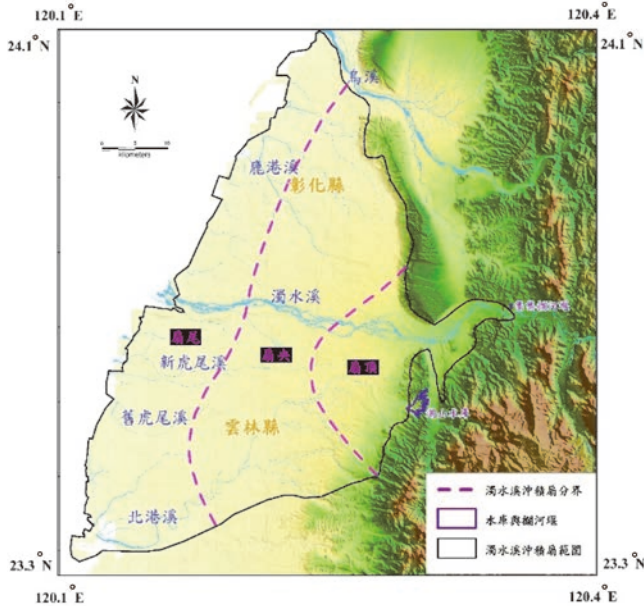


圖 1 濁水溪沖積扇地形分區圖。主要由濁水溪沖積而成，分布範圍涵蓋彰化縣及雲林縣等地區，為臺灣西部最重要的農業區域（修改自水利署 [5]）。

此當地下水受到超抽時，地下水位將因補注不及而造成水位降低，進而引起地層壓縮變形，歸納上述濁水溪沖積扇之壓縮潛能如表 1。

表 1 濁水溪沖積扇壓縮潛能統計表。

沖積扇位置	主要土壤組成	壓縮潛能
扇頂	礫石及粗砂	低
扇央	介於扇頂與扇尾之間	高
扇尾	細砂及黏土	高
壓縮潛能差異說明		
粗顆粒土壤，具有高強度及高透水性，不僅可壓縮性低，且容易獲得地表水之補注，因此地層下陷的潛能低。		

## 監測方法

圖 3 為多元整合空間資訊監測技術的示意圖，其中包含有 GPS 固定站、雷達干涉、水準測量、地陷監測井與地下水位站，分別從空中、地面與地下不同面向來監測整個地層下陷（濁水溪沖積扇整體的監測設備分布如圖 4），因為每個監測設備的優缺點不同，空間解析度與時間解析度亦不相同（詳如表 2），因此本研究利用其監測設備之特性，使其彼此之間可以互補與交互驗證；利用水準測量與雷達干涉監測成果，找出整個調查區的下陷範圍、下陷中心與下陷趨勢面；在嚴重的地層下陷中心，結合 GPS 固定站、地陷監測

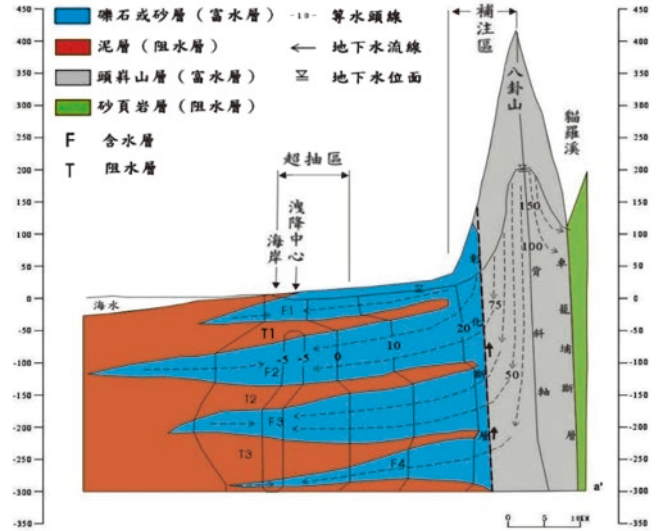


圖 2 濁水溪沖積扇之水文地質概念模型。由上而下有四個含水層及四個阻水層，扇頂部份地層主要由礫石及粗砂構成，地層沉積物顆粒越往下游越細，至沿海地區地層已改由細砂及黏土為主（修改自賴典章等 [4]）。

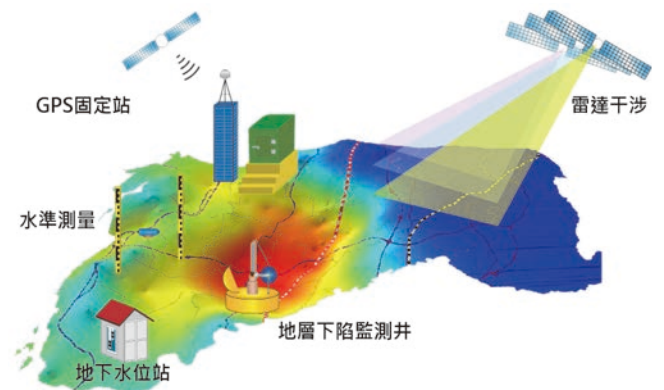


圖 3 多元整合空間資訊監測技術示意圖。分別由空中（InSAR、GPS）、地面（水準測量）與地下（地層下陷監測井、地下水位站）三個層面進行監測。

井與地下水位井，分析下陷中心的下陷機制與預測其未來之下陷量。透過現象的分析與機制的瞭解，最後提出減緩地層下陷的可能方案與建議。

表 2 多元整合空間資訊監測技術之解析度與量測精度比較表

項目	水準測量	GPS 固定站	地陷監測井	InSAR
空間解析度	1.5 ~ 2 km	10 ~ 15 km	5 ~ 10 km	6 ~ 25m
時間解析度	1 year	1 day	1 month	12 days (以 Sentinel 衛星為例)
垂直變動量測精度	0.5 ~ 1 cm	0.5 ~ 1 cm	0.1 ~ 0.5 cm	0.5 ~ 1 cm



圖 4 濁水溪沖積扇監測點位分佈圖。圖中綠色圓點為水準樁，紫色、橘色與黃色方形分別為 GPS 固定站、地陷監測井與水準測量參考點，桃紅色三角形為 GPS 與地陷監測井共站處，藍色實線為水準測線，紅白線段為高鐵路線，綠色空心線為中山高速公路。

## 監測成果

### 水準測量

濁水溪沖積扇的水準路線總長 970 公里，水準測量的量測精度為  $3 \text{ mm } \sqrt{K}$  ( $K$  代表距離，單位：公里)。本研究使用的水準儀為 Trimble Dini 12 的水準儀，搭配原廠配置的鋼鋼尺，同時在鋼鋼尺上加裝溫度計，量測溫度以利後續誤差改正。測量誤差改正則包括有視準軸誤差改正 (collimation error correction)、地球曲率改正 (curvature correction)、水準尺溫度 (rod temperature correction) 改正與折射誤差改正 (refraction error correction)。平差計算採用不等權最小二乘法進行整體平差，其中以距離倒數為權，為確保整體觀測量品質及可靠度，本研究採用 Baarda 之 “Data Snooping” 理論 [6,7]。整體平差報表的各觀測量標準化改正數  $W_i$  計算方法為：

$$W_i = \frac{V_i}{\delta V_i} \quad (1)$$

其中  $V_i$  及  $\delta V_i$  分別為第  $i$  個觀測量之殘差及其後驗標準偏差。選擇信心區間為 0.01，則 data snooping 的臨界值為 3.3，即當  $W_i > 3.3$  時，判定在該顯著水準下第  $i$  個觀測值予以淘汰剔除，以確認每次水準測量成果與品質。

利用每次獲得的水準測量高程計算下陷量後，再利用地質統計內插方法 (Kriging) 內插下陷等值線，最後獲得每年的下陷量圖，將上述成果累計之後，得到累積下陷量圖。圖 5 為 1992 ~ 2017 年雲林地區地層下陷累積下陷量圖，由圖中顯示整個雲林地區在過去 25 年中，最大累積下陷已超過 160 公分以上，主要沉陷位置發生在內陸的虎尾鎮、土庫鎮、元長鄉與褒忠鄉等四個鄉鎮，高速鐵路正通過最嚴重的下陷中心。

### GPS 固定站

本研究結合經濟部水利署、中央地質調查研究所、內政部地政司、中央氣象局與工業技術研究院等五個單位共 40 個 GPS 固定站，組成聯合 GPS 監測網 (圖 6(a))；同時利用瑞士伯恩斯大學所發展之 Bernese 軟體，每日自動化對該監測網分析各站之三維坐標變化。

根據 GPS 固定站於 2010 年 4 月至 2017 年 4 月的觀測結果 (圖 6(b)) 顯示，在雲林虎尾鎮 (GFES)、土庫鎮 (TKJS) 與元長鄉 (KTES) 下陷最為顯著，年下陷速率最高達到每年 6 公分/年，其監測下陷變形的成果與水準測量相當一致。由於 GPS 具有連續性觀測的優點，未來可利用時間序列分析 (例如：主成

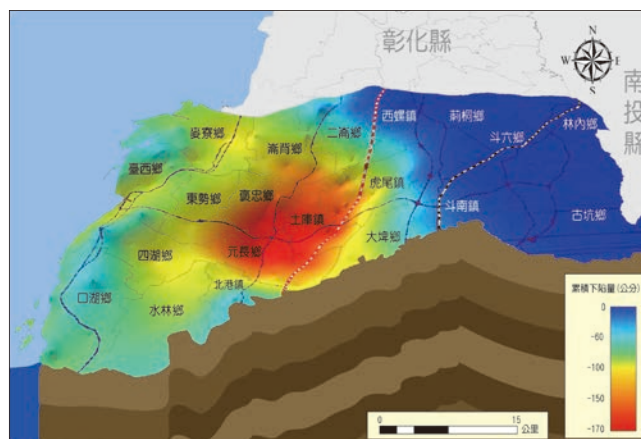


圖 5 1992 ~ 2017 年雲林地區累積下陷量圖。主要沉陷區域集中在虎尾鎮、土庫鎮、褒忠鄉與元長鄉等區域。

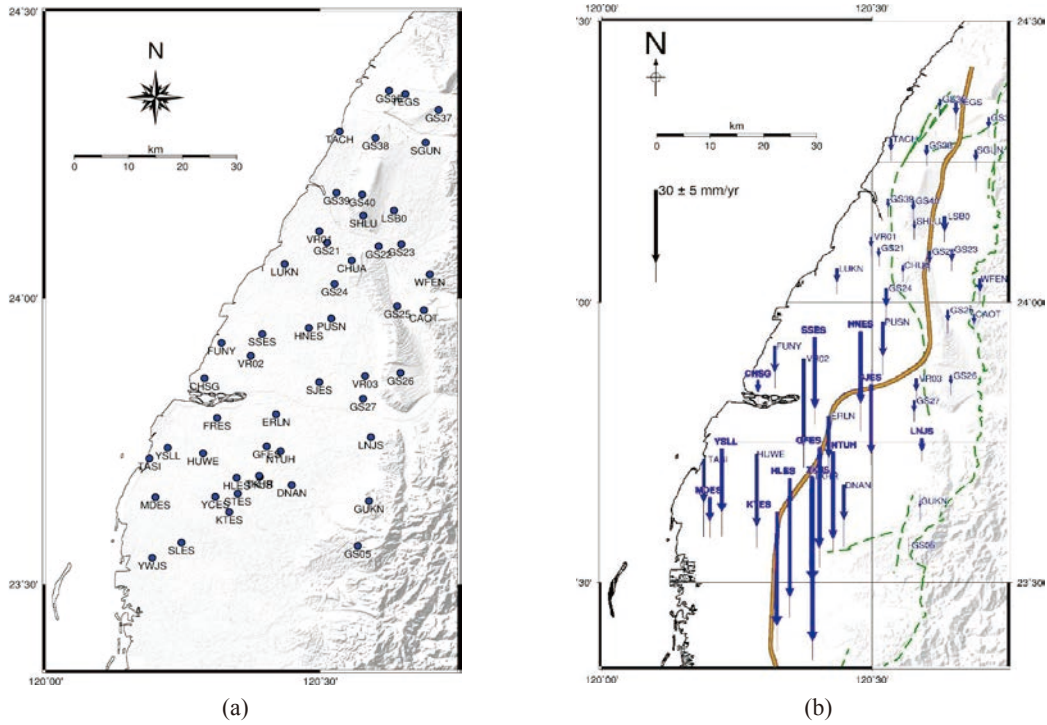


圖 6 (a) 雲彰地區 GPS 固定站分布圖；(b) 2010 年 4 月至 2017 年 4 月 GPS 高程變化圖。

分分析法，Principal Component Analysis)，精確地分析地層因季節性的變化與地下水的豐枯期造成地表高程的變化。

### 地陷監測井

如同第一節所敘述，濁水溪沖積扇的水文地質條件複雜，各個含水層也具有不同特性，為能監測地層下不同含水層的壓縮量，因此透過地陷監測井（參考圖 7）可釐清地表下不同地層之壓縮量。地陷監測井的原理，主要是依據現場鑽探的資料與地球物理探勘的方法，在地層下不同深度土層的分界位置設置磁環（每口地陷監測井設置約 20 ~ 26 個磁環），透過量測磁環位置的變化，可獲得不同深度的土層壓縮變化量，該監測井的量測精度經由量測不確定統計分析，可達到優於 1 mm 的監測精度<sup>[8]</sup>，截至民國 106 年底在濁水溪沖積扇則已設置 31 口地陷監測井（監測井分佈位置參考圖 4）。

圖 8 為雲林縣土庫國中地陷監測井的量測成果（相關位置參考圖 4），由圖中顯示，該地區主要的壓縮深度發生在地下 200 公尺以下，該深度之土層主要為砂層與泥層之薄層相互交疊而成，因此只要抽水，

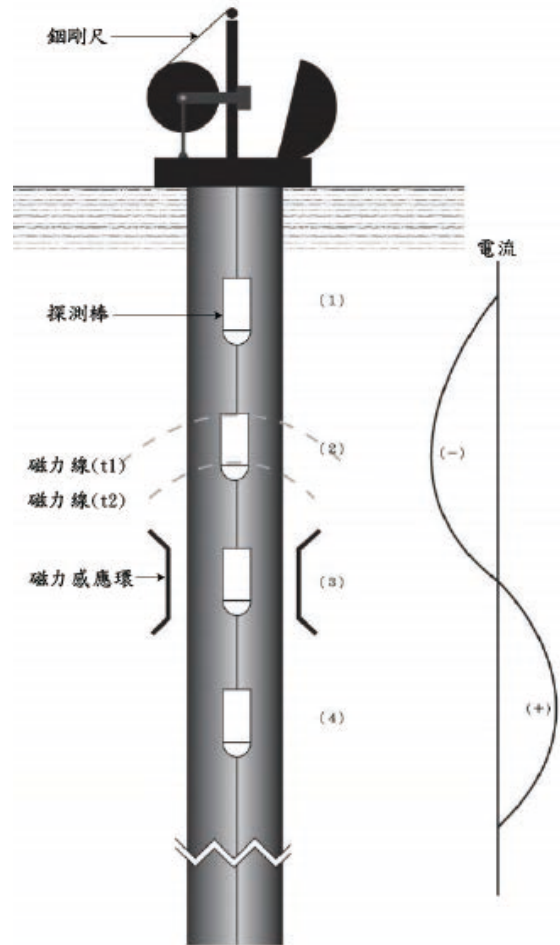


圖 7 地陷監測井示意圖

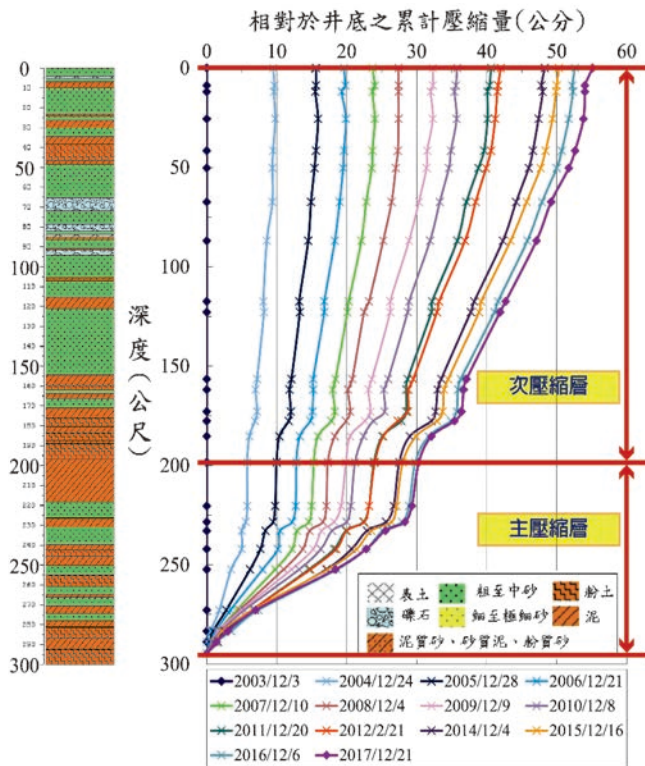


圖 8 土庫國中地陷監測井歷年累積壓縮量圖

因為厚度較薄，會有快速壓縮的效果，次要壓縮層主要發生在地底下 0 至 200 公尺之間。由圖 8 亦顯示該款的地陷監測井可以獲得地底下多個地層的壓縮量，進一步釐清可能的抽水來源，例如：如果主要壓縮深度發生在深層地層，則抽水主要來源可能為工業用水與民生用水，如果主要壓縮深度發生在淺層地層，則抽水主要來源可能為農業用水，因此透過地陷監測井資料，則可以有效掌握造成土壤壓縮的應力來源，進一步擬定防治措施減緩地層下陷。

## 雷達干涉技術

多時域雷達干涉技術 (Multi Temporal InSAR, MT-InSAR) 技術為涉及多時期影像之雷達干涉處理方法，不僅可提供高密度面狀資訊，同時在精度亦可達釐米等級，即與傳統測量方法相當之精度，具快速監測大範圍之地表形變之特性，目前在台灣地區主要使用三種 MT-InSAR 技術，主要包括 (1) Hooper *et al.* [9] 提出利用強度值與相位分析來辨識永久散射體之永久散射體差分干涉技術 (Persistent Scatterers InSAR, PSI)，目前該方法成功應用於彰化雲林地區的地層下陷監測 [1]。(2) Berardino [10] 提出短基線子集差分干涉技術

(Small Baseline Subset Differential method)，它能夠解決 DInSAR 技術中因基線過長導致的幾何去相關性誤差，並利用所有獲取的數據以提高取樣的時間解析度，確保變形的時間序列分析具有較高的空間密度，同時也適合對非都市區域地表變形場時間演化進行分析。(3) Zhang *et al.* [11] 提出的時域相關點雷達干涉 (Temporality Coherence Point InSAR, TCPInSAR)，該方法主要不使用相位解纏，改以最小二乘法解算，獲取長時間之地表變形速率，目前該方法成功應用於嘉義地區的地層下陷監測 [12]。

本研究利用上述三種方法中的 SBAS 法，對於濁水溪沖積扇進行實驗，同時利用水準測量成果進行校正，獲得永久散射體密度可達 77 像素/平方公里，而相同區域內之水準測量樁點位密度僅 0.2 個/平方公里，透過 210 個的監測點交叉驗證 PSI 與水準測量的成果顯示兩者的均方根誤差 (RMS) 達到 0.8 公分，顯示雷達干涉技術可獲得大範圍與高精度的地表變形量。同時藉由資料融合處理方法，更可有效結合「重複觀測」之水準測量與 SBAS 成果，提高整體監測精度，進而獲得更真實之地表變形趨勢面。

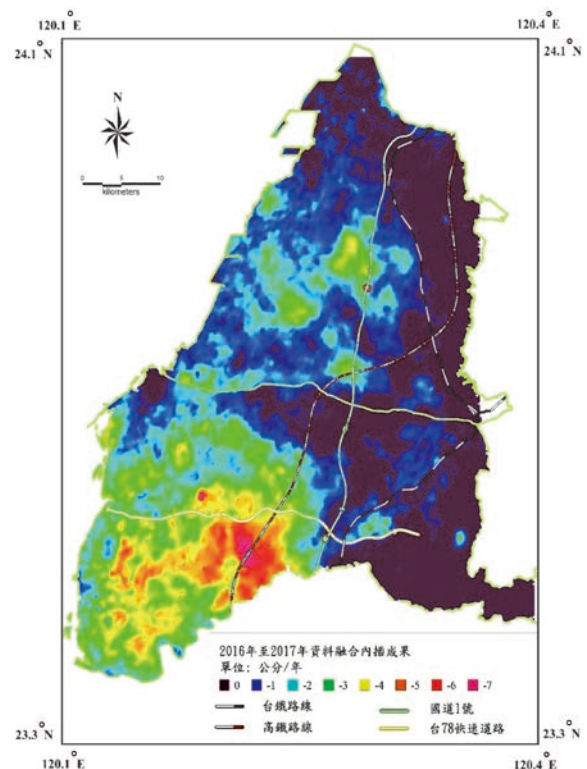


圖 9 2016-2017 年 SBAS 法與資料融合處理之雷達干涉成果。

圖 9 為藉由資料融合處理後之 2016 至 2017 年雷達干涉成果監測成果顯示，濁水溪沖積扇地區主要下陷區域分布於中山高速公路沿線以西地區（即扇央與扇尾地區），其中以彰化縣溪湖鎮、溪州鄉、二林鎮與大城鄉，雲林縣虎尾鎮、土庫鎮、元長鄉、褒忠鄉、四湖鎮與口湖鎮等區最為明顯，上述成果與水準測量成果一致。

## 結論與未來發展

長期地層下陷已經使得國土安全產生影響，台灣地區目前已發展多元化監測系統，分別從空中、地面與地下不同面向來監測地層下陷，除了可以快速掌握地表變形量，同時可以掌握主要應力的來源（地表深層或淺層的應力與變形量），搭配政府的地層下陷防治對策，以有效的減緩地層下陷速率，降低持續下陷面積。未來整體地層下陷監測也將朝向大範圍自動化監測的方向來發展，其中包括將應用全台 400 個全自動連續觀測的 GPS 固定站，瞭解重點地區的三維變化量，同時結合衛載的雷達干涉技術，快速掌握地表變形，利用資料融合技術精確瞭解地層下陷的影響範圍。

## 參考文獻

1. Hung, W.C., Hwang, C., Chen, Y.A., Chang, C.P., Yen, J.Y., Hooper, A., & Yang, C.Y. (2011), Surface deformation from persistent scatterers SAR interferometry and fusion with leveling data: A case study over the Choushui River Alluvial Fan, Taiwan. *Remote Sensing of Environment*, 115(4), 957-967.

2. Teatini, P.; Tosi, L.; Strozzi, T. (2011), Quantitative evidence that compaction of Holocene sediments drives the present land subsidence of the Po Delta, Italy. *J. Geophys. Res.*, 116, B08407.

3. Ng, A.H.M.; Ge, L.L.; Li, X.J.; Abidin, H.Z.; Andreas, H.; Zhang, K. (2012), Mapping land subsidence in Jakarta, Indonesia using persistent scatterer interferometry (PSI) technique with ALOS PALSAR. *International J. Appl. Earth Obs. Geoinform*, 18, 232-242.

4. 賴典章、費立沅、江崇榮 (2003)，台灣地下水分區特性，水文地質調查與運用研討會論文集。

5. 經濟部水利署 (2014)，103 年度多元化監測及整合技術應用於台北、彰化及雲林地區地層下陷監測。

6. Koch, K.R. (1987), *Parameter Estimation and Hypothesis Testing in Linear Models*. Springer, Berlin, 378 pp.


7. Caspary, W.F. (1988), *Concepts of Network Adjustment and Deformation Analysis*. Monograph 11, Scholl of Surveying, University of New South Wales, Kensington, NSW, Australia, 183 pp.

8. Hung, W.C., Hwang, C., Liou, J.C., Lin, Y.S., & Yang, H.L. (2012), Modeling aquifer-system compaction and predicting land subsidence in central Taiwan. *Engineering Geology*, 147-148, 78-90.

9. Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., & Kampes, B. (2004), A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*, 31(23), 611-615.

10. Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. and Sansosti, E. (2002), A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 40, 2375-2383.

11. Zhang, L., Ding, X., & Lu, Z. (2011), Ground settlement monitoring based on temporarily coherent points between two SAR acquisitions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 66, pp. 146-152.

12. Hung W.C., Hwang C., Chen, Y.A., Zhang L., Chen K.H., Wei S.H., Huang D.R., Lin S.H. (2018), Land subsidence in Chiayi, Taiwan, from compaction well, leveling and ALOS/PALSAR: aquaculture-induced relative sea level rise, *Remote Sensing*, 10, 40; doi:10.3390/rs10010040 



中國土木水利工程學會  
CIVIL AND HYDRAULIC ENGINEERING

電話：(02) 2392-6325

傳真：(02) 2396-4260

e-mail: service@ciche.org.tw

一個凝聚產官學土木專業知識的團體  
一個土木人務必加入的專業學術團體  
一個國際土木組織最認同的代表團體  
一個最具歷史且正轉型蛻變中的團體

歡迎加入學會



<http://www.ciche.org.tw>

請上網下載入會申請表