



# 地層下陷 成因 與 防治

徐國錦／國立成功大學資源工程學系 教授

林政偉／國立成功大學水工試驗所 助理研究員兼副組長

地層下陷發生於台灣以及世界多處，對社會安全與經濟發展造成重大影響。地下流體過度抽取加以區域水文地質特性，為許多沖積沉積環境地層下陷的主要原因。土壤的壓密與地表的沈陷，可源於地表荷重增加、阻水層或厚實含水層中夾帶豐富黏土薄層之孔隙水壓下降，或是水壓震盪重複變化之震陷效應。釐清複雜的土壤水力互制行為以及掌握水文地質性質空間變化，才能對地下水超抽導致地層下陷區域變化的機制提出科學解釋。據以調適產業發展，降低地下水資源需水量並控制用水量進行有效防治。本文介紹地層下陷的成因、台灣地層下陷的現況及力學可能機制與防治的建議。

## 前言

人類因生存的必要，提昇生活品質的需要以及擴展個人資財的想要，大量使用自然資源。當需求與慾望超出自然系統所能負荷時，地球母體產生系統內部調適改變，環境反撲，危及人類自身的生存。人類使用自然資源謀求生存是必然的，所面臨的挑戰不是該不該使用自然資源，而是如何節制地與智慧地使用自然資源。工程師雖有人定勝天的抱負，更應有從自然學習，創造與自然共存的適應方法，借用自然資源繁衍子孫，延續自然各類物種後代。台灣自然資源有限，可承載生命體有限，而水土資源為人民基本生存所必需，應要謹慎資源開發與保育，為自己與地球生物留下活路。台灣地區地層下陷已經大幅衝擊可用水土資源，其影響廣大。然而地層下陷行為是一種回逆困難的物理過程，土壤因孔隙壓力變化而壓密，即使土壤孔隙水壓回昇，也沒有辦法回復到原本的總體積狀態，因而造成地質資源的損失。人類常寄望特效藥治病、神奇發明或快速工程手段改變逆境，解決看似直接，卻實為複雜的問題。地層下陷發生後，專家與學者嘗試尋找兼顧經濟與有效防治的可能工程方法，抑止地層下陷的惡化，如使用注水的方式 (Miozzi<sup>[1]</sup>; Castelletto *et al.*<sup>[2]</sup>) 或是注入二氧化碳 (Comerlati *et al.*<sup>[3]</sup>) 來抬升地層下

陷區域 (如：義大利威尼斯)，但是工程效果與後續環境影響仍需觀察。了解地層下陷的現況、力學可能機制及地陷區產業趨勢變化，將有助於有效地層下陷防治方法的提出與施行。

## 地層下陷定義與成因

地層下陷為地球表面相對於基準點產生向下的移動。地層下陷不只發生在台灣地區，世界多國如美國、英國、義大利、澳洲、德國、印度、瑞士、紐西蘭、墨西哥、日本、印尼、越南與中國大陸等地區，都有類似的地層下陷問題與挑戰，也都造成社會經濟的重大成本付出。

地層下陷可由自然因素或人為因素所產生<sup>[4]</sup>。自然成因如在卡斯特地形中石灰岩的溶解、火山噴發造成地質構造的改變、地震、斷層活動、有機土壤的分解、永凍層的融化與海水潮汐掏刷海岸線等。地層下陷的人為成因則有廢棄地下礦坑形變引致的沉陷，超高建築、地表水庫、橋樑公路等營建工程的巨大負載施壓造成近地表土壤結構變形，水、天然氣以及石油等地下流體的抽取造成地層的壓密。其中以地下水資源開發導致的地層下陷最為普遍，面積也廣大，造成巨大的經濟損失與地質資源的流失。

長久以來地下水即為地表水之外的重要替代水源。工業革命後，人口快速成長、生活水準提昇、農業活動擴展與工業快速發展，造成需水量增加。地下水由於供水穩定性高且經由地質材料自然過濾而水質佳，使用量亦快速提昇。但是地下水過度抽取引致地層下陷，已經發生在包含台灣的世界多處沖積地形的堆積環境<sup>[5,6]</sup>。

地層下陷引致環境改變的速率可能極為快速或緩慢，規模大或小。如地下隧道工程不當施工，可能造成局部地面的快速塌陷；海岸線侵蝕土層，造成沈陷差異，建築物瞬間毀損；而抽水或溶解等作用導致的損壞，則是漸次發生，需要等沉陷量累積達到一定程度，才會發現大面積地層下陷的嚴重性。因此，地層下陷的觀察與持續精準量測，為了解地層下陷發生的首要工作。由於地層下陷可能同時有自然與人為的成因，如何量化區隔不同成因所造成的地層下陷，作為人為改善措施的成效評估，亦為科學與工程的挑戰。

## 地層下陷的監測

台灣地區常見之地層下陷監測技術包含全球衛星導航系統（GNSS）、雷達干涉測量（InSAR）、地表水準樁、分層監測井及深層水準樁等（圖 1），可由空中、地面及地下等不同面向，具體掌握地層下陷時空變化趨勢。各監測技術之時空解析度與量測週期比較參見表 1，空間解析度以水準量測最佳，量測週期最短為 1 小時（深層水準樁），最長為 1 年（地表水準高程）。監測技術依時間、空間延展性與連續性，可概分為點狀及面狀監測兩種。面狀監測（以雷達干涉衛星影像量測為主）可觀測大區域地層下陷趨勢，藉由廣域觀測特性可完整獲致各地區下陷邊界及中心資訊。點狀監測技術則是針對單一點位進行地層下陷觀測，依量測位置概分為地表及地下量測。傳統地表量測方式以水準高程檢測及全球衛星導航系統（GNSS）兩種方法為主，而地下土層量測方法則有深層水準樁及分層監測井兩種。各地層下陷監測技術量測方法及流程說明如下：

雷達干涉測量技術是利用攝像雷達所獲取之複數資料（complex data），利用其相位（phase）值來粹取出地表三維資訊。其能夠偵測大面積地形變動之分布情勢，因此在大範圍地層下陷監測上有相當高的應用價值。廣域的地層下陷判釋能夠提供下陷成因之探討

和防治策略之擬定。

水準高程檢測係經由水準高程測量方法量測埋設於地面之水準樁點間之高程差，藉由已知點的高程推算未知點的高程，利用不同時間的測量結果，獲得該時間段內之地面變形情況。水準高程測量目前仍然是世界各國都最常使用的量測方式，若只需要了解單一垂直方向之地層形變時，此種方式之量測精度相當高但最耗時和成本，並容易受天候所影響，而獲得之點位資料也較為局部不夠廣泛。

全球衛星導航系統是由設置於地面之觀測站接收衛星所發射的電磁波訊號，量測地面與衛星之間的距離，至少須有 4 顆衛星所得之距離，再透過幾何原理求解地面接收儀之三維座標，精度可達公分級。其精度介於水準高程量測和雷達干涉測量（InSAR）之間，可 24 時連續觀測地表定點高程變化，掌握變化情形。由於量測速度快且經費較低，因此目前已被廣泛使用，惟其資料浮動性較大，僅以掌握地陷趨勢變化為主。

深層水準樁係鑽孔至地表下觀測深度後置入外管以隔離土層，再於外管中置入內管，並於其底部建構水泥砂漿基座，使該基座坐落於欲觀測深度之地層上，則內管管頂高程變化即為地表下觀測深度土層高程變化。透過自記式量測系統（包含電子式變位計、自動記錄器、防潮儀器箱及資料擷取器原版分析軟體等）可自動連續監測地表至觀測深度地層間壓縮量，即時掌握地層下陷變化趨勢。其監測機制及工法較單純，故障風險較低，能夠確保觀測資料品質及穩定度。惟深層水準樁僅能進行定點單一土層監測，若要達到分層監測功能，必須增加土地使用面積，建置各分層之深層水準樁，其效益性較低。

分層監測井乃根據地下水文地質條件，鑿設一口固定深度監測井，於井內不同深度配置磁環，藉由量測各磁環位置變化，可獲得各分層土層下陷資料。其量測精度和穩定性高且能夠監測各分層壓縮量變化，配合地下水位觀測，可進一步釐清各分層變形機制，具體研擬地層下陷相關防治措施。目前台灣地區已設置約 57 口分層監測井，各監測井可同時掌握約 20 餘層土層變化，透過定期至現地量測，可瞭解該分層監測井內各磁環位置變化，藉以推估地底下各土壤分層之壓縮變化趨勢。惟其初期投入經費較高且透過人工每個月量測，1 年僅可獲得 12 筆資料。

表 1 地層下陷量測技術時空解析度比較表

| 量測技術            | 空間解析度    | 量測週期    |
|-----------------|----------|---------|
| 雷達干涉測量 (InSAR)  | 25 m     | 12 days |
| 全球衛星導航系統 (GNSS) | 10~15 km | 1 week  |
| 地表水準高程量測        | 1.5~2 km | 1 year  |
| 分層監測井           | 5~10 km  | 1 month |
| 深層水準樁           | -        | 1 hour  |

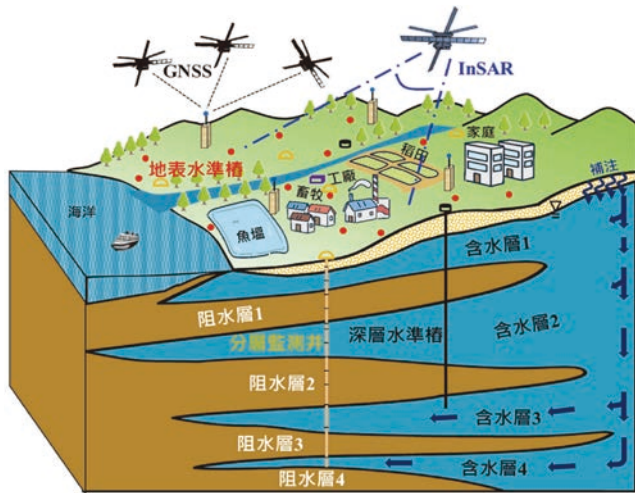


圖 1 台灣地層下陷多元化監測系統

### 台灣地層下陷情況

台灣地區的地層下陷問題嚴重，首先於 60 年代台北盆地被觀測到，隨後地下水禁抽與加強地表水源補給，有效改善台北市的地層下陷問題。伴隨著經濟發展與養殖漁業的興起，台灣沿海地區的地下水超抽造成了嚴重的地層下陷問題。依據水利署歷年於全台之水準點檢測成果顯示，臺灣地區曾發生地層下陷地區有宜蘭縣、臺北市、桃園市、彰化縣、雲林縣、嘉義縣、臺南市、高雄市及屏東縣等九個縣市（如圖 2 淺

藍色範圍），地層下陷範圍約 2,500 平方公里，最大累積下陷量約 3.56 公尺。在歷經多年的地層下陷防治工作後，全台下陷呈逐年改善趨勢，近年地層下陷顯著地區則集中在彰化縣、雲林縣、嘉義縣及屏東縣，但隨水文氣象狀況變異，用水量改變，地層下陷狀況亦隨之變化。顯著地層下陷面積（年下陷速率大於 3 公分）已由 1,529 平方公里（民國 90 年）減至 106 平方公里（民國 106 年），最大下陷速率位為雲林縣元長鄉的 5.5 公分 / 年（參見圖 3）。

### 地層下陷對資源使用的衝擊

人類賴以維生的自然資源包含地質資源（固體、流體、能源與空間）、生物資源（植物與動物）與再生資源（陽光、潮汐、風能）。在人類歷史上，自然資源的多寡直接影響社會的成長與發展，當區域資源耗盡時，人群移往資源豐裕的場域求生存，而廢棄原有的

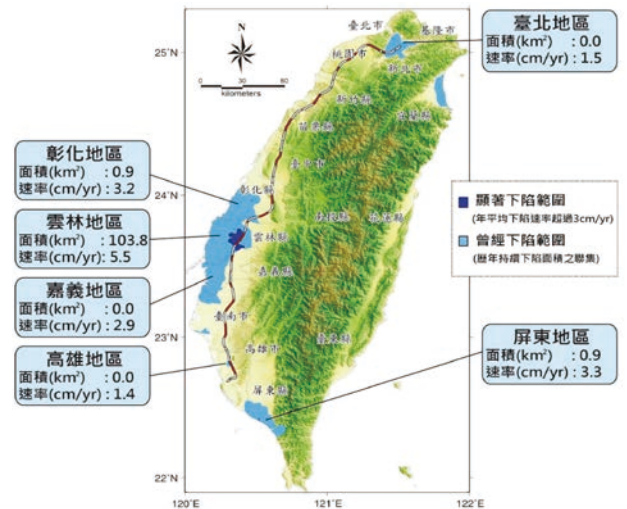


圖 2 109 年度臺灣地層下陷檢測成果圖

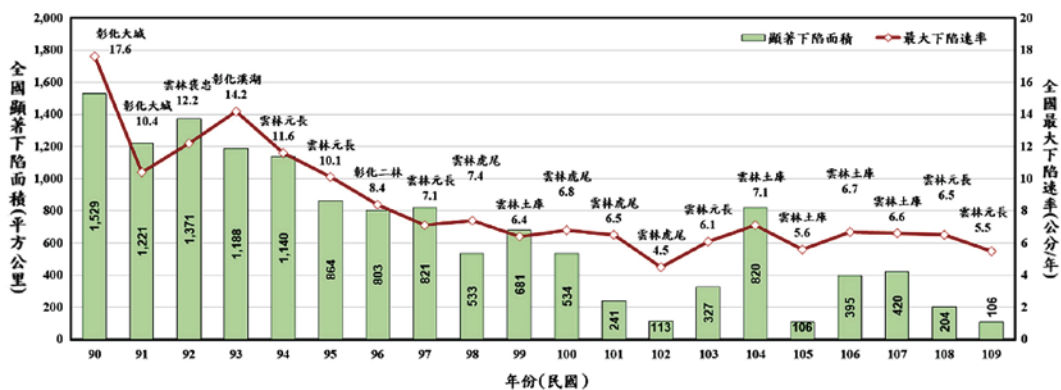


圖 3 臺灣歷年最大下陷速率及顯著下陷面積變化圖

生活場域。由於固體、流體與能源的過度抽取導致區域地層下陷，直接影響地表與地下資源的可用量，包含可耕種農產面積減少，地下水體儲存空間損失，資源流體傳輸能力的下降與地質可儲存空間（如氫、天然氣）的降低。

地層下陷產生的地表變形直接影響人類生活，積水不退、土壤鹽化導致可耕地減少，減少生物資源的生產力與多樣性，以及土地資源的可利用性。地層下陷導致的差異沈陷，可能直接危及公共工程安全如高鐵、交通道路，以及排水設施的失效，也會造成建築斷裂或傾斜，危及生命財產，並降低土地與不動產的市值，弱化社區功能，加速人口流失。因此地層下陷損壞自然資源的可可用性，不利於人類與生態的永續發展。

地層下陷產生的地下空間損失，衝擊資源的聯合運用，降低地下水與能源儲存空間。以濁水溪沖積扇為例，從 1960 年代沿海養殖漁業大量使用地下水，造成地層下陷，從海水養殖改為海淡水混合供水。地層下陷中心由沿海轉為內陸至雲林虎尾、元長附近。自 2010 ~ 2020 期間，彰化雲林土體孔隙壓縮體積為 27,588 萬立方米，相當於 0.54 座曾文水庫 2021 年的有效容量，或為 5.41 座湖山水庫 2021 年的有效容量<sup>[7]</sup>。當地表水庫不易覓地獲得社會共識籌建時，無聲的地下資源損失，損及地下水資源與地質儲能空間資源，應及早防治。

## 孔隙水壓變化引致地層下陷之物理機制

台灣沖積沉積環境在地史時期內，由於海面上升或陸地下降，造成海進海退而形成非固結或半固結的含水層與阻水層。含水層通常由粗顆粒如砂、礫組成，有時夾帶細顆粒的薄不易透水層。而阻水層由細顆粒土壤如粉與黏土組成，隔離上下水層的連通。因為重力作用，在泥沙運移過程，重的顆粒會先沈降堆積，所以含水層在沖積扇頂顆粒的顆粒，會粗於扇央，又更粗於扇尾。土壤是一個三相系統，由固體顆粒、水與空氣組成。固體顆粒係由岩石經過風化、侵蝕、搬運及堆積作用所形成，依據固體顆粒主要尺寸之大小可分成礫石 (gravel)、砂 (sand)、粉土 (silt) 及黏土 (clay)。土壤係屬獨特之天然材料，其性質與顆粒之尺寸分布、形狀、排列方式及緊密度有關，亦受控於孔隙間水與空氣含量。引起土壤體積變化之因

素主要有 (1) 土壤顆粒的重新排列，(2) 土壤團粒的變形，及 (3) 孔隙水及空氣的排出。

在自然季節氣候變化中，濕季雨水多，補注地下水，地層中孔隙水壓增高；而乾季雨水少，補注地下水少，因勢能原理，地層中孔隙水壓逐漸消散。地下水位呈現季節性但具有延遲的變化。地下水資源蓄存於地下孔隙間，需藉水井開鑿汲取而利用。當水井抽水時，含水層壓力水頭將以抽水井為中心，形成一錐形洩降面，以產生水力坡降，造成四週地下水向井流動。當停止抽水後，此錐形洩降面將回復。當區域總抽水量超過補注量時，則區域地下水水位將會發生下降現象。

無論是由於水位下降，或是水位震盪均有可能造成土體的變形壓縮。壓密理論多用於細顆粒土壤因孔隙水壓下降使用的變形。而震陷理論用於描述水壓震盪導致顆粒狀土壤的變形，二者均可用於解釋地下水位變化引致地層下陷之解釋<sup>[8,9]</sup>。

## 壓密理論

土壤受到增額壓應力所發生之變形，可以分為瞬時壓縮變形及壓密作用發生之變形。瞬時壓縮變形可由於土顆粒架構為了有效傳遞外加載重而發生顆粒排列方向之轉變，或土壤團粒 (cluster) 本身之彈性變形所致。此種變形由可回復之彈性變形 (elastic deformation)，與不可回復之塑性變形 (plastic deformation) 所構成。而壓密作用為一種與經過時間有關之土壤體積壓縮現象，壓密作用產生之變形主要發生於飽和或接近飽和黏土，又可分為主要壓密 (primary consolidation) 變形及二次壓密 (secondary consolidation) 變形，前者為孔隙水之排出所引起土體孔隙之壓縮，後者則可能由於包圍黏土顆粒周圍水膜之潛變 (creep) 所發生。綜合言之，由土壤之內部應力來考慮壓密現象時，亦可將壓密現象視為土壤受一外加的有效壓縮應力 (effective compressive stress) 作用，體積發生收縮的現象。

有關土壤壓密作用泛指粉土與黏土等低透水土層受外加應力後孔隙水及空氣的排出所致之土壤體積變化行為。地下水層系統可概分為含水層與阻水層，含水層為透水性良好之土壤所組成，阻水層則由黏土等低透水性土壤組成。然而，由於地層之組成並非均值，故位於滲透性良好之含水層中常見存在許多較薄且側向長、寬度

不足以分隔鄰近含水層之低透水性土層，其常被視為由具高壓縮性之黏土層或粉土層所組成，這些土層內具有垂直滲流，且分別以連續或不連續方式存在於含水層各位置。因此壓密作用導致之地層下陷現象同時發生於阻水層，也普遍存在於含水層中。

含水層系統地下水水位變化及黏土層壓縮量間之關係亦可依 Terzaghi [10] 發展之有效應力原理說明，其中，總應力係由上層飽和、非飽和沉積土層及地殼構造應力所產生，總應力改變及孔隙水壓改變皆可導致有效應力改變。含水層中土壤固體顆粒與孔隙水體係其共同承擔土壤荷重及外加應力，其中固體顆粒承受之應力稱之為有效應力 (effective stress)，孔隙水體則有孔隙水壓力。抽水導致孔隙水壓下降，而注水則使孔隙水壓上升。假設含水層系統內黏土夾層之厚度為水平側向延展，黏土夾層內主要之孔隙水壓梯度變化為垂直 (z 方向) 分佈，若進一步假設其產生之主要應變也是垂直方向，則有效應力可採用一維的方式表示為  $\sigma' = \sigma - u$ ， $\sigma'$  為有效應力， $\sigma$  為總應力， $u$  為孔隙水壓力。在深層土壤，假設水位變化引致總應力變化可忽略 ( $\Delta\sigma = 0$ )，則含水層水位變化所引致之土層有效應力變化可表示成  $\Delta\sigma' = -\Delta u$ 。若統一除以水體密度，則含水層水位變化所引致之土層有效應力變化僅與水頭變化有關  $\Delta\sigma' = -\gamma_w \Delta h$ ，其中  $\Delta\sigma'$  為有效應力增量，正值表示增加，負值表示減少； $\Delta h$  為受壓含水層之水頭改變量，正值表是水頭上升，負值表示水頭下降。因此抽水引致水頭降低，而有效應力增加，亦即固體顆粒承受之應力增加，造成壓密，反之亦然。但實驗結果顯示即使水位回升，土體並未能回復之原來的體積，視水文地質材料而異。應力與應變的本構關係可使用彈性、塑性與黏性進行描述。

大地工程使用土壤壓縮儀量測土壤的固結特性 [11]，實驗時間需花上數天到數週，繪出有效應力與體積應變的關係。壓縮試驗通過對土壤樣品施加不同的載荷，並測量試體變形，計算土壤壓密性質。圖 4 顯示 Libyan 黏土與 Cambridge 砂的受力壓密行為。當垂直應力逐漸增大時，垂向應變也隨之變大。實驗結果顯示受壓力時，黏土的應變量遠大於砂，亦即黏土層的壓縮量遠大於砂質土。而垂直應力減少後，砂質土回復較接近原壓密曲線，黏土的回復量遠低於原壓密曲線，這也是在地層下陷區水文地質調查中需特別注意含水層中是否包含或夾雜豐富的黏土層。

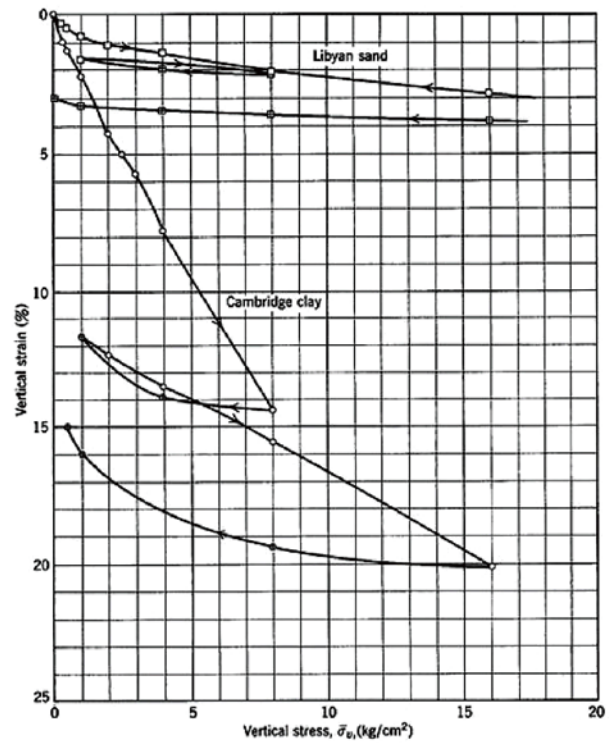


圖 4 土壤壓縮儀黏土與砂的受力壓密行為 [11]

### 震陷理論

地下水系統中人為抽水與自然乾濕季補注，將造成含水層水位上下震盪，可能導致地層的壓縮 [12]。震陷 (shakedown) 理論 [13] 用以描述在週期載重下，彈塑材料的變形行為。圖 5 顯示顆粒土壤在週期載重下的行為可分為四個階段。階段一為完全彈性行為 (purely elastic)：在此階段反覆施加之應力非常小，材料未進入到降伏階段，而呈現線性行為。受力產生的應變將會完全回復，沒有任何塑性永久變形產生。將反覆施作應力加大，將進入階段二的彈性震陷行為 (elastic shakedown)：此時反覆施加之軸差應力比完全彈性行為時所施加之軸差應力大，在最初有限次數的應力 - 應變循環下材料呈現塑性行為，但塑性變形微小。而在最終的反應則為線性行為。如持續將反覆施作應力加大，將進入第三階段塑性震陷行為 (plastic shakedown)。在有限次數的反覆載重下，材料呈現明顯的塑性變形累積，但隨後會達到穩定狀態，出現彈性變形伴隨遲滯的現象，顯示有部分的能量被材料所吸收。如繼續將反覆施作應力加大，將進入階段四的塑性潛變震陷行為 (plastic creep shakedown)。初期行為與塑性震陷行為相似，隨載重次數增加材料有明顯塑性變形累積，且每

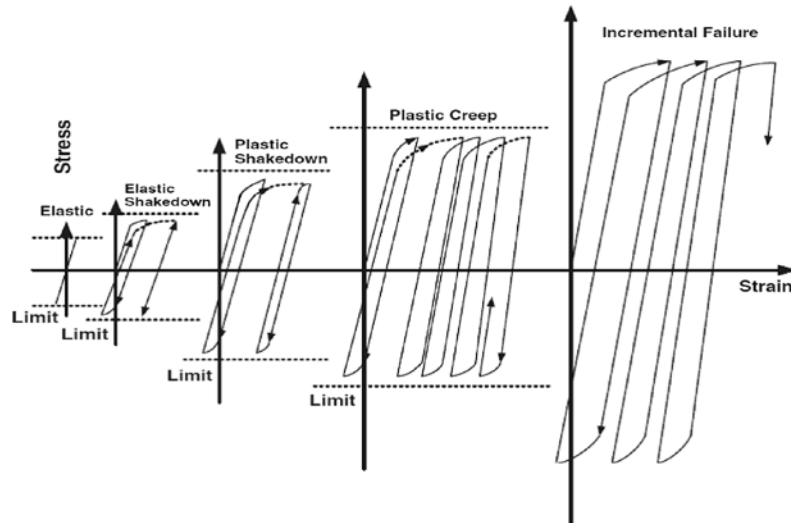


圖 5 反覆載重下，彈塑性材料的震陷行為<sup>[13]</sup>

一應力循環皆有遲滯的現象。與塑性震陷行為為差異於後期發生的潛變行為，塑性變將持續累積，穩定而無突然崩潰的現象發生。如持續將反覆施作應力加大，將進入第五階段增量崩潰（incremental collapse or ratcheting）行為，材料明顯的進入降伏區，塑性變形迅速地累積，材料在數次的反覆載重後即發生破壞。

## 地層下陷防治

地下水超抽為台灣沖積地形地層下陷的人為主因，減少地下水用水量，增加地水補注，加強合理水權分配與提昇用水科技有助於為地層下陷的防治。由於地下水資源佔台灣淡水資源的三分之一強，濁水溪沖積扇與屏東平原使用地下水為淡水資源的比例更高。主要地層下陷區地下水的的需求源為農業、畜牧業、養殖漁業及公共給水。在產業方面，農業提供基本糧食，為基本安全所需，必需予以維持，藉由精準農業技術的發展，提昇水資源使用效率，減少地下水抽用量。而魚類為人類與活動最重要的蛋白質來源，海洋污染與全球氣候暖化造成魚類資源萎縮。隨著全球人口成長，人類對水產品需求增加，海洋捕撈水產品將因資源過度消耗而加以限制，養殖漁業需求量將持續增加。台灣養殖漁業主要分為內陸魚塢養殖、淺海養殖與海面箱網養殖，其中以內陸魚塢養殖面積最大，為維護海洋資源永續利用，養殖漁業將會持續發展，藉由改善養殖技術，減少地下水抽用，在農漁業發展與環境友善間取得平衡。

在管理面上，糧食、能源與水皆為資源，且具有競合的關係，應以糧食、能源與水資源的整體平衡發展作為宏觀管理基準。地層下陷造成國家多重資源的損失：地下水過度抽取，補注來不及回補，造成水資源量的損失。地層水壓下降，造成海水入侵，地下水質劣化，為質的損失。過度抽取富含礦物質的地下水灌溉農業，造成土壤鹽化，不利作物生長，為糧食與土地資源的損失。地下空間壓密，減少地下水資源與替代能源轉化之化學能與物質能介質的地質儲能空間，為水資源與能源產業的損失。

地層下陷成因，有自然與人為因素，必須予以確認區隔，才能對防治措施的有效性予以評估。雖然地下水抽取為地層下陷的主因，但是地下水資源並不是不能使用，而是應如何合理使用。圖 6 顯示濁水溪沖積扇雲林縣田洋國小地下水分層觀測井與龍巖國小累積地層下陷分層監測井時間圖。圖中顯示地層下陷呈現短週期隨乾枯季水位震盪的可回復現象與長期不可逆的趨勢。因此在可回復土壤壓密現象的地下水抽水應視為容許抽水量，而導致地層下陷不可回復抽水量則應作為地下水資源使用的管制上限。以美國南加州的水資源使用為例，嚴格限制私人抽取地下水，以生活污水回收再注入地層，一方面阻止海水入侵，一方面提供地下水資源。抽水時，以過去最低水位為限制標的，避免地層下陷的產生，並進行大區域的民生供水。在氣候變遷下，地下水資源越顯示其重要性，而地層下陷也越需及早防治。

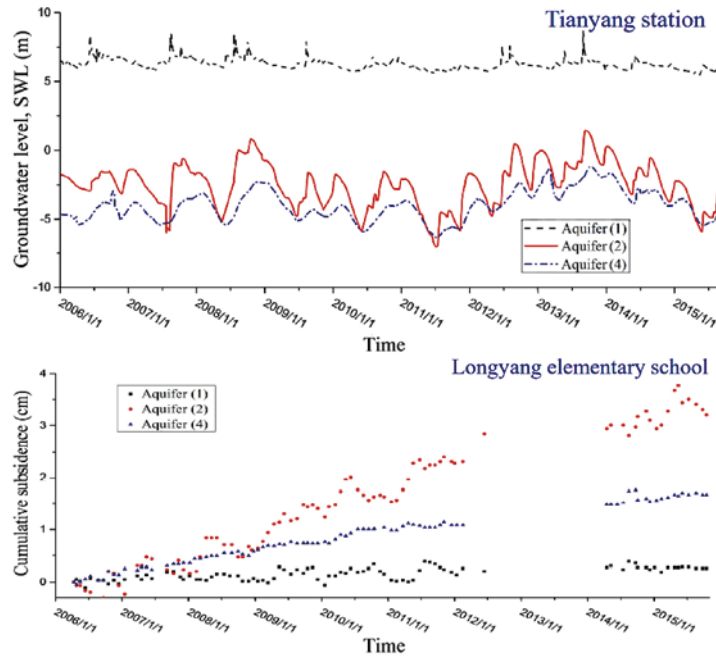


圖 6 濁水溪沖積扇雲林縣田洋國小地下水分層觀測井與龍巖國小累積地層下陷分層監測井時間圖

### 結語

台灣地區地下水使用由來已久，早期政府水資源開發，重視地表水庫。當環保意識抬頭，水庫場址難覓，則開發伏流水。民眾長期使用地下水，卻缺乏有效管理。在氣候變遷下，水資源需求的壓力日益增加，地下水扮演較為穩定的水資源來源。地層下陷實已危害糧食、能源與水土資源。地質調查所與水利署對台灣地區已經進行水文地質調查與建置數個地下水觀測井網，提供深度約三百米以內的水文地質與地下水位變化資訊，水利署也建置多站與多種地陷觀測儀器，提供不同時間與空間解析度的地層下陷監測資料。這些資料提供台灣地區地層下陷研究珍貴的資料，但地層下陷解決的挑戰仍舊在前：地質鑽探井間距約為五公里，平面解析度低，水文地質地層延伸範圍確認不易。鑽井深度多未達基岩，深層水文地質不詳，未能完全掌握可能之顯著壓縮層總厚度與深度。水位觀測井深度不足，未能掌握深層水壓變化。落實地下水管理，掌握地下水用水量，精進地陷量測技術，加深與加密的地質探勘、水文地質、地球物理及地球化學探測，有助於地層下陷的掌握與管理。

### 參考文獻

1. Miozzi E. (1969), Venezia nei secoli: Ed. Libeccio, vols. I,II,III, Venezia.
2. Castelletto, N., M. Ferronato, G. Gambolati, M. Putti, and P. Teatini, (2008), Can Venice be raised by pumping water underground? A pilot

- project to help decide, *Water Resources Research*, Vol. 44, W01408, doi: 10.1029/2007WR006177.
3. Comerlati A., M. Ferronato, G. Gambolati, M. Putti and P. Teatini, (2003), Can CO<sub>2</sub> help save Venice from the sea?, *EOS Trans. AGU* 84 (2003) (46), 552-553.
4. Galloway, D.L., Jones, D.R., and Ingebritsen, S.E. (1999), Land subsidence in the United States, *U.S. Geological Survey Circular*, 1182, pp. 117.
5. Hu, R.L., Yue, Z.Q., Wang, L.C., Wang, S.J. (2004), Review on current status and challenging issues of land subsidence in China, *Eng. Geol.*, 76 (1-2), 65-77.
6. Hung, W.C., Hwang, C.W., Chang, C.P., Yen, J.Y., Liu, C.H., and Yang, W.H. (2010), Monitoring severe subsidence in Taiwan by multi-sensors: Yinlin, the south Choushui River Alluvial Fan. *Earth Science Geology* 59, 1535-1548.
7. 周子硯、徐國錦、景國恩、葉昭龍、饒瑞鈞 (2021)，地層下陷引致之空間資源損失與監測設置之探討——以濁水溪沖積扇為例，第十三屆地下水資源及水質保護研討會暨台灣地下水資源暨水文地質學會年會，第 76 頁，國立臺灣大學，台北。
8. Tsai, M.-S. and Hsu, K.-C. (2018), Identifying poromechanism and spatially varying parameters of aquifer compaction in Choushui River alluvial fan, Taiwan, *Engineering Geology*, 245, 20-32.
9. Chang, W.-J., Hou, S.-H., and Huang, A.-B. (2017), Physical simulation of aquifer compression due to groundwater fluctuation, *Engineering Geology*, 231, 157-164.
10. Terzaghi, K. (1925), Principles of Soil Mechanics I—Phenomena of Cohesion of Clays, *Engineering News-Record*, 95(19), 742-746.
11. Lambe, T.W. and Whitman, R.V. (1991), *Soil Mechanics*, Wiley, 1991.
12. 劉軒豪 (2013)，顆粒性土壤受反覆載重與永久變形之關係，國立交通大學土木工程學系碩士論文。
13. Johnson, K.L. (1986). Plastic flow, residual stresses, and shakedown in rolling contact. In: *Proc., 2nd International Conference on Contact Mechanics and Water of Rail/Wheel Systems*. University of Rhode Island, Kingston, University of Waterloo Press, Ontario, Canada. 