



台灣 雲林地區 地層下陷

磁環分層 監測井 彎曲度檢測

黃鈺祐／國立成功大學資源工程學系 研究生

吳泓昱*／國立成功大學資源工程學系 助理教授

林政偉／國立成功大學水工試驗所水資源環境組 副組長

陳芳瓊／經濟部水利署水文技術組第三科 科長

台灣地區因經濟的迅速起飛，導致農業與工業等對於水資源的需求大增，為應對該用水的需求，地下水資源成為主要的水源之一。當長期的抽取地下水時，會導致地下水位不斷下降，若遇到降雨無法及時補充時，地下岩層和土壤會有明顯的下陷現象。為監測地層下陷的情況，經濟部水利署在彰化、雲林等多個縣市設置地層下陷監測井，藉由觀測磁環的深度位置去推估地層的壓縮量。而當我們以磁環感測器量測磁環位置時，皆假設地層下陷監測井為垂直井記錄磁環位置與估算地層壓縮量，卻忽略了井孔可能因人為鑿井、地層的側向壓力等種種因素，導致磁環位置與原本假設的垂直井位置有差異，因此導致錯估地層之壓縮量。故本研究採用高解析度超音波攝影進行施測，透過儀器內的三軸磁力計、三軸加速度計來計算井的方位角（Azimuth）、傾角（Tilt），並利用所量測得到之深度、方位角、傾角等資訊，以三角函數解算真實井下的走向，藉此獲取真實的磁環位置，且透過高解析度超音波攝影所紀錄之影像可以推估地層下陷監測井地下水位之深度位置。後續可依定期量測之結果建立資料庫，而該資料庫除包含井的真實垂深、井孔走向、井壁影像、方位角、傾角與磁環真實位置，並可依蒐集到的資訊來定義一套井孔的健康度標準，依該資訊作為是否淘汰該井之依據。

關鍵詞：地層下陷監測井、地下水、地球物理井測

前言

隨著台灣地區經濟發展的蓬勃進展，農業用水需求與極端氣候變遷的影響，對於水資源的需求已逐漸攀升。為了應對此情勢，地下水成為當地主要的取水來源之一。然而，長期超抽地下水導致地下水位不斷下降，當降雨無法及時補充時，地下岩層和土壤就會出現明顯的下陷現象。這種情況在全台皆有相關的觀察紀錄，其中以雲林地區特別嚴重^[1]，不但對建築物、道路和農田造成損害，也可能引發其他問題，如地下

水鹽水入侵和土壤沉降等。為了掌握彰化及雲林地區地層下陷的情形，水利署已於彰雲地區建置完成 36 口磁環分層式地層下陷監測井（以下簡稱地陷井），可以透過定期測量不同深度的磁環獲得其下陷資訊。以往都是透過磁環感測器（磁簧開關型、磁力計型）進行磁環深度量測，然而，對於井下的走向、傾角等真實狀況（以下簡稱井況）的分析資料一直付之闕如。因此在 111 年度水利署的地陷監測井現地井測計畫中，新增使用高解析度超音波攝影進行施測，透過施測的結果可以得到地下水位深度、井的方位角、傾角與磁環深度等資訊。111 年度計畫之結果顯示，位於客厝國小

* 通訊作者，sonata.wu@gmail.com

之地陷井量測結果有將近 3° 的傾角，其井底東西向偏差值為 14.6 公尺（西），南北向則為 5.4 公尺（南），仁和國小、土庫國中及宜梧國中之傾角皆小於 1°，因此其井底偏差值東西向皆在 2 公尺內，南北向偏差在 4 公尺內^[2]。假設建置地陷井時已發生偏斜，則可能高估監測井深度範圍（約 300 公尺）之下陷量；若因土層側向應力引致逐年之變化，則可能低估監測井深度範圍之下陷量。因此本研究望透過井下測量技術掌握真實的井下狀況與磁環位置，建立起地陷井之井孔狀況資料庫，提供磁環量測地層下陷之參考基準。

雲林區地質概述

雲林縣之地質構造（圖 1）主要為中新世至更新世的台地礫石層及沖積層^[3]，其屬臺灣西部麓山帶地質區，由第三紀碎岩層組成，主要岩石是砂岩和頁岩的互層，局部夾有石灰岩和凝灰岩的凸鏡體或薄層所組成。縣境內沖積層絕大部分屬現代沖積層，主要由黏土、粉砂、砂和礫石組成，廣泛地覆蓋在平原與盆地區內。而雲林地區位於濁水溪沖積扇南端，其扇頂地區以礫石及沖積砂土為主、扇尾則以細砂及泥居多，其形成過程為河流夾帶上游岩石碎屑，由扇頂至扇尾沉積，在搬運過程中較重顆粒下沉，較輕顆粒則沉積於表面接續河水方向移動。地層依照該方式逐漸向上堆積形成粗顆粒與細顆粒的互層狀態^[4]。

可量測地陷監測井量測導管彎曲度之檢測技術及校正方法

導管彎曲度之檢測技術

井下測量（Borehole Logging）一直以來都在石油工業和地球物理探勘中被廣泛應用，其用來評估井孔狀態和井孔穩定性，主要優勢在於提供地表下井孔和地層物理參數的高解析度（公分級別）資訊。不論井孔是否使用套管，在其尺寸大於儀器直徑的情況下，皆可獲取連續性之井測資料。井下環孔攝影是獲得連續的井孔影像和方位資訊的最佳工具，尤其是高解析度超聲波環孔攝影（High Resolution Acoustic Televiewer），可適用各種情況下的井下測量，包括混濁的鑽井泥漿或地下水，都可以獲得良好的井況資訊。除了超聲波影像之外，井孔或井下導管的方位和傾角也是校正井孔影像的重要資訊，幫助了解井孔當前狀況和走向（圖 2）。而美國地質調查所（USGS）已使用此技術校正地下水井中水位的變化多年，其利用井測工具量測井孔偏差，有效修正不同地點及年代井位之差異性，確保其水位監測計畫的準確性^[6]。

高解析度超音波攝影可透過記錄聲波的傳輸時間（Travel Time）與振幅（Amplitude）生成連續影像，且藉由三軸磁力計方位角定向，能夠得到連續且定向的 360° 井壁視圖，從井孔影像中可以辨別地層特徵、關係和方位角及應力方向（圖 3）。

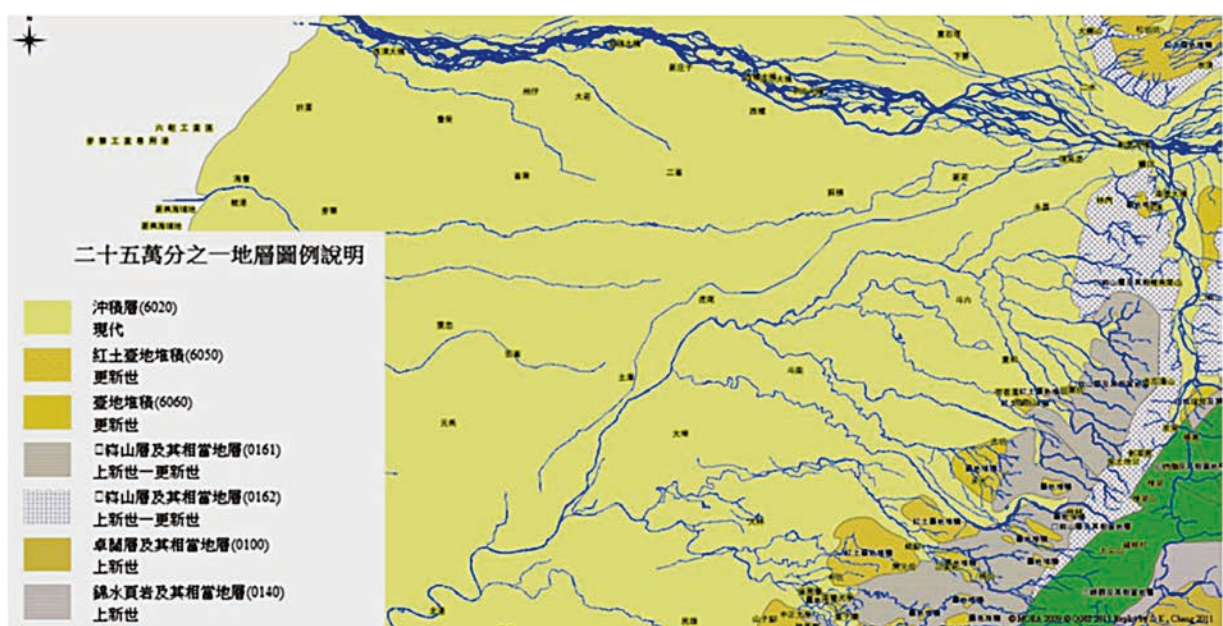


圖 1 雲林地區濁水溪沖積扇二十五萬分之一地質圖^[5]

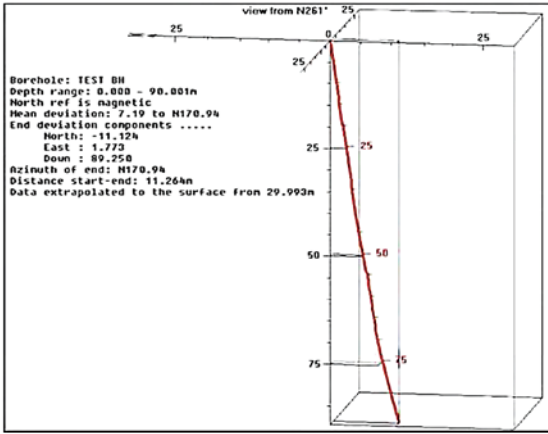


圖 2 聲波造影演算之井孔偏移與井向 [7]

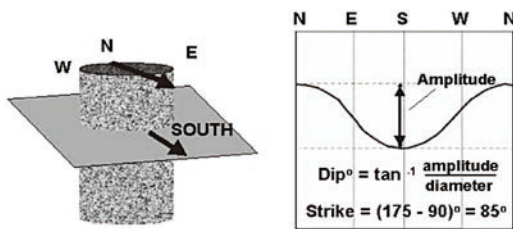


圖 3 井內定向 360 度圖像和方位角和傾角計算 (摘自 Williams, J.H. and Johnson, C. D. [8])

高解析度超音波攝影內設置 0.5 ~ 1.5 MHz 的訊號傳感器、三軸磁力計及三軸加速度計，訊號傳感器須透過泥漿或地下水等介質傳遞聲波，透過紀錄聲波的傳輸時間 (Travel Time) 及振幅 (Amplitude)，其收回的聲波信號會被記錄成井下照片的圖像，時差數據可用於生成高解析度之影像 (圖 4)，而方位角 (Azimuth) 與傾角 (Tilt) 可透過三軸磁力計及三軸加速度計紀錄之三分量差值推導出。

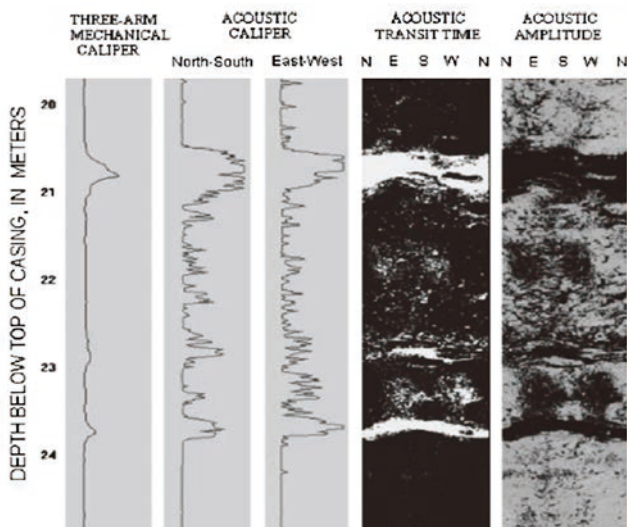


圖 4 150 毫米直徑鑽孔中的三臂機械和聲學測井儀井測以及聲波時差和振幅電視圖像 (摘自 Williams and Johnson [8])

井偏井斜量測原理

三軸加速度計與三軸磁力計被運用於解算井位之井偏井斜，其基本原理是透過儀器主體坐標系與地理坐標系之間的角度差，將儀器記錄的加速度量值及磁通量值進行坐標系統的轉換，進而反推出井偏井斜之角度 [9,10]。\$X_b/Y_b/Z_b\$ 為儀器主體坐標系統，分別指向儀器徑向方向、切向方向及儀器軸線方向，\$E/N/U\$ 則為地理坐標系統，分別指向東方 (\$E\$)、北方 (\$N\$) 及向上方向 (\$U\$)。產生三種平面：水平面 (\$H\$)、鑽井橫切面 (\$P\$) 及與井孔變形長軸一致的井孔彎曲面 (\$V\$)。儀器主軸方向 (\$Z_b\$) 與鉛垂方向之夾角即為井斜角 (\$\delta\$)，而井孔彎曲面與北方之夾角則為井偏角 (\$\theta\$) 如圖 5 所示。透過井斜不同導致重力 (\$G\$) 會沿井軸及其垂向的分量發生變化，在儀器主體坐標系統上就會記錄有三個加速度分量 (\$G_x, G_y, G_z\$)，即可利用此分量計算出井斜角 \$\delta\$，可表示為式 (1)。

$$\delta = \tan^{-1} \frac{\sqrt{G_x^2 + G_y^2}}{G_z} \quad (1)$$

式(1)中 \$\delta\$ 為井斜角，\$G_x, G_y, G_z\$ 分別代表加速度計分別於 \$x, y, z\$ 軸向之讀數。

藉由加速度分量 (\$G_x, G_y\$)，即可算出重力工具面角 \$T\$，如式(2)所示。

$$T = -\tan^{-1} \frac{G_y}{G_x} \quad (2)$$

磁力計所紀錄的磁通量 (\$M\$) 在地理坐標系統中可以用 \$M_E/M_N/M_U\$ 表示但在儀器主體坐標系統中則標示為 \$M_x/M_y/M_z\$ 如式(3)所表示，兩不同座標系統間可藉由一旋轉矩陣 \$C\$ (式(4)) 進行轉換。

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = C \cdot \begin{bmatrix} M_E \\ M_N \\ M_U \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} 0 \\ M \cos \phi \\ M \sin \phi \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)中 \$M_x/M_y/M_z\$ 為儀器在主體座標中 \$x, y, z\$ 軸之讀數，\$M_x/M_y/M_z\$ 為地理坐標系統中三軸之讀數，\$\phi\$ 為所在地之緯度角度，兩不同座標系統間可藉由一旋轉矩陣 \$C\$ 進行轉換，如式(4)所表示。

$$C = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \delta \cos T & \sin \theta \cos \delta \cos T + \cos \theta \sin T & -\sin \delta \cos T \\ -\cos \theta \cos \delta \sin T & -\sin \theta \cos \delta \sin T + \cos \theta \cos T & \sin \delta \sin T \\ \cos \theta \sin \delta & \sin \theta \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)中 \$T\$ 為重力工具面角，\$\delta\$ 為井斜角，\$\theta\$ 為井偏角，\$\theta\$ 可藉由式(5)求得。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{M_z - G_z Q}{M_x G_y - M_y G_x}$$

其中 $Q = M_x \times G_x + M_y \times G_y + M_z \times G_z$ (5)

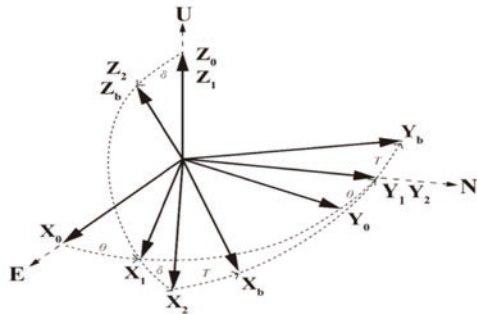


圖 5 座標轉換過程示意圖 (修改自 Ren et al. [9])

研究成果

本研究目前針對彰化及雲林地區皆有進行量測作業 (圖 6)，因彰化地區地層下陷監測井 (以下簡稱地陷井) 施測當時可下放深度較淺，故本文中僅以雲林地區之地陷井做討論。雲林地區一共測試 4 口地陷井，分別位於大埤鄉仁和國小、元長鄉客厝國小、土庫鎮土庫國中及口湖鄉宜梧國中。除宜梧中外都已於不同時間點完成重複施測，以確認其準確度與可信度。

磁環真實位置

探針通過地陷井內設置的磁環位置時會使三軸磁力計及記錄之影像產生異常，該異常部分通過三軸磁力計做為主要判斷磁環位置之依據，其影像為輔助判斷如圖 7 所示。透過判斷出來之磁環位置進行真實垂深校正，仁和國小為 110 年設站因監測期距不長故無列入修正表內，客厝國小、土庫國中、宜梧國中 3 口井累積下陷井偏井斜修正後如表 1 所示。以客厝國小為例，民國 92 年 10 月量測第 20 個磁環位置為 297.175 公尺，而民國 110 年量測同一磁環位置為 296.563 公尺，故客厝國小 0 ~ 297 公尺累積的下陷為 0.612 公尺。若設站時監測井已發生偏斜，則可能高估監測井深度範圍 (約 300 公尺) 之下陷量，以設站時監測井已發生偏斜進行分析顯示，監測期間現地量測與實際垂向累積量之差異不大。但若井偏斜因土層之側向應力導致逐年的變化，則可能低估監測井深度範圍之下陷量，以設站時監測井未發生偏斜進行分析顯示，客厝國小地陷監測井之現地量測與實際垂向累積量差異可能達 40 公分 (297.2 公尺深度範圍)。

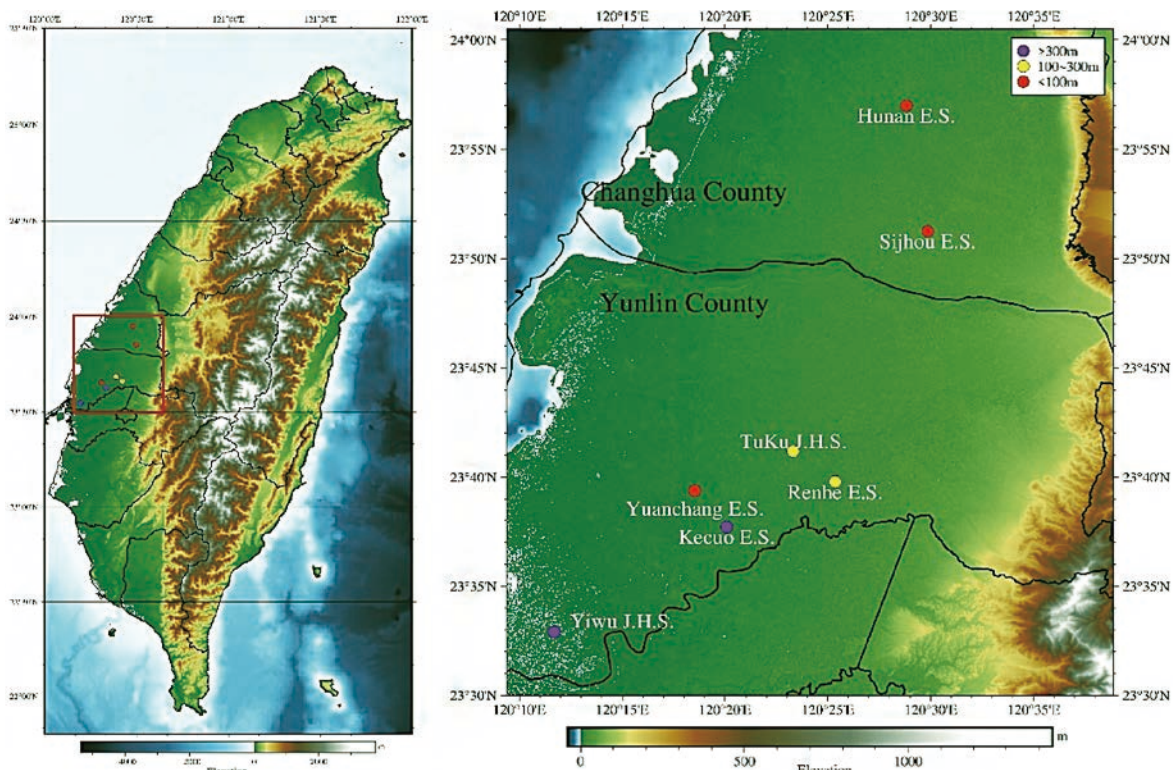


圖 6 施測井位圖

(圖中 E.S. 為國小 Elementary School 縮寫，J.H.S. 為國中 Junior High School 縮寫)

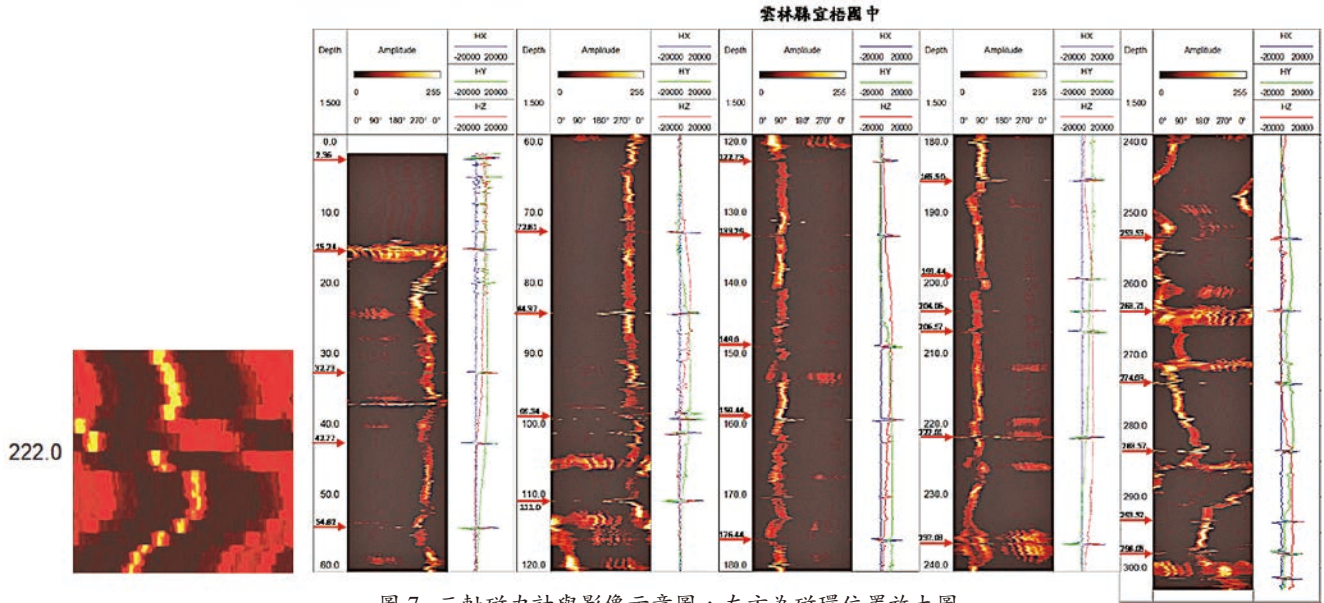


圖 7 三軸磁力計與影像示意圖，左方為磁環位置放大圖

表 1 地陷井累積下陷結果修正

| 監測井 | 量測期距 | 對應井測深度之磁環編號 (對應深度) | 現地量測垂向累積下陷 (公分) | 修正後垂向累積下陷 (公分) | |
|-----|----------|-----------------------|--------------------|----------------|--------|
| | | | | 設站已傾斜 | 設站未傾斜 |
| 客厝 | 92~110 年 | No. 20 (297.2 公尺) | 61.20 | 61.12 | 101.34 |
| 土庫 | 92~110 年 | No. 19 (242.0 公尺) | 40.70 | 40.69 | 43.99 |
| 宜梧 | 98~110 年 | No. 27 (298.6 公尺) | 17.80 | 17.80 | 17.83 |

彎曲度檢測

於不同時間點施測後，量測之方位角、傾角與量測路徑進行解算可得到該井孔之真實垂深與真實井況，依照解算出之結果繪製出三維走向圖如圖 8 所示，將不同時間所測得之結果整理，並以井底的水平位移量與垂直測深計算求得井頂傾角數值，客厝國小將有將近 3° 的傾角之外，其餘 3 口地陷井仁和國小、土庫國中及宜梧國中之井底傾角皆小於 1°，以一般鑽井工程角度來看，井頂傾角小於 5° 皆可視為垂直井 [11]。

地表下地下水深度

高解析度超音波攝影需透過泥漿、地下水等介質傳遞聲波，並記錄時差數據利用此數據生成井下的影像，反之無介質則無法生成影像，如圖 7 中在約 14 公尺處未接觸到介質前其振幅較低與 14 公尺之後有接觸地下水之振幅有明顯差異，因此我們可以藉由影像開始紀錄之深度為地表下地下水深度如表 2 所示。

表 2 地陷井之地表地下水深度

| 井位 | 時間 | 地表下地下水深度之深度 (公尺) |
|------|------------|------------------|
| 客厝國小 | 2022/08/17 | 16.999 |
| 土庫國中 | 2022/08/18 | 17.599 |
| 仁和國小 | 2022/08/19 | 16.935 |
| 宜梧國中 | 2022/10/28 | 13.945 |

討論

美國地質調查所 (USGS) 繪製水位分布圖時透過磁性和陀螺儀校正地下水位，並表明透過磁性與陀螺儀校正後的地下水位即使相隔多年，也具有良好的一致性 [6]。當初建立地陷井時未量測井偏井斜作為後續參考依據，現今僅能透過高解析度超音波攝影定期量測獲取井偏井斜資訊。若僅依靠磁環感測器量測地陷井內磁環位置作為地層下陷概況之數據進行分析，需注意可能低估該地點之地層下陷量，以井偏斜程度較嚴重的客厝國小與井偏斜程度較輕微的宜梧國中做比較，宜梧國中

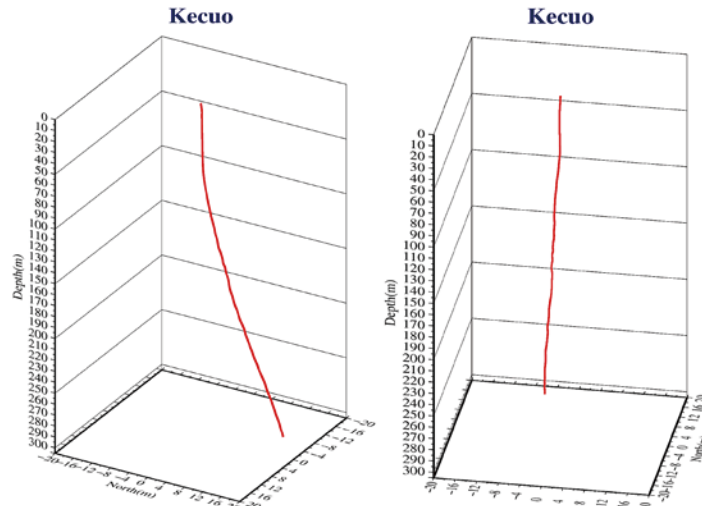


圖 8 雲林縣客厝國小第三次施測地陷監測井之磁環位置與井偏井斜狀況

井頂傾角約 0.082° 、客厝國小井頂傾角約 2.992° ，兩口井透過量測獲得的井偏井斜校正垂向累積下陷量前後差距，可以發現客厝國中受井偏斜的影響校正前後差距約 40 公分，反之宜梧國中差距僅 0.03 公分，從兩口井比較中可以發現到井偏井斜量測的重要性。

結論

透過高解析度超音波攝影內建置的三軸磁力計與三軸加速度計可以獲得高解析度、連續性的井下測量資料確認磁環位置深度，同時藉由影像校正其確切位置，精度可達公分等級，並可透過方位角與傾角將磁環深度校正至真實垂直深度。該技術唯擔憂處為井管撓曲至儀器無法下放至井底，客厝國小量測出傾角度數為 4 口井最大卻依然可下放至井底 300 公尺，反之土庫國中卻僅下放至 243 公尺處，推估此現象為客厝國小傾角變化為緩慢升高，而土庫國中傾角在井內某處有巨大的變化導致無法下放獲取資料。該技術可以準確地得到井下資訊，幫助掌握真實井下資訊，包括井的方位角、傾角、真實垂深等，若進行定期量測建立一資料庫包含該井所量測到之資訊，以此提供資訊判斷是否淘汰地層下陷監測井之依據，磁環方面根據量測所得之資訊，可以掌握真實垂直向的磁環深度，避免低估地層下陷之壓縮量。而地陷井之地下水位深度僅可以作為地下水位面參考，因其與地下水觀測井在設站時目的不同，故鑿井時開篩與否會影響到井內的水位高度，若以井測獲得之地下水位深度計算地下水高程將有一定程度之誤差，故僅可供參考使用。

參考文獻

1. 經濟部水利署網站 (2023), https://landsubsidence.wra.gov.tw/water_new/Home/Index
2. 經濟部水利署 (2022), 111 年度彰雲地層下陷監測井井況評估及量測精度探討。
3. 經濟部中央地質調查所網站 (2023), <https://gis3.moeacgs.gov.tw/gwh/gsb97-1/sys8/t3/index1.cfm>。
4. 蔣榮、吳建宏、林宏明 (2017), 「雲林地區沖積層大深度壓密沉陷行為之研究」, 中華防災學刊, 9(2), 147-153.
5. 吳尹聿 (2012), 雲林地區濁水溪沖積扇地下水補注地質敏感區地電阻勘查, 碩士論文, 國立臺灣海洋大學, 臺灣博碩士論文知識加值系統, <https://hdl.handle.net/11296/ax5a32>。
6. Twining, B.V. (2016). *Borehole Deviation and Correction Factor Data for Selected Wells in the Eastern Snake River Plain Aquifer at and near the Idaho*. National Laboratory, Idaho: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2016-5163 (DOE/ID-22241), 23pp., plus appendixes, <https://doi.org/10.3133/sir20165163>.
7. Siddans, A.W.B. (2002). "Structural Geology Using Borehole-wall Imagery: Case Study of an OPTV Log in Flagstones, North Scotland," *First Break*. 20, 623-629.
8. Williams, J.H. and Johnson, C.D. (2004). "Acoustic and optical borehole-wall imaging for fractured-rock aquifer studies." *Journal of Applied Geophysics*, 55(1), 151-159. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2003.06.009>
9. Ren Y, Wang Y, Wang M, Wu S, and Wei B. (2014). "A measuring system for well logging attitude and a method of sensor calibration." *Sensors*. 14(5), 9256-9270. <https://doi.org/10.3390/s140509256>
10. Zhang, W.X., Chen, W.X., Di, Q.Y., Sun, Y.T., Yang, Y.Y., and Zheng, J. (2017). "An investigation of the extraction method of gravitational acceleration signal for at-bit dynamic inclination measurement." *Chinese J. Geophys.* 60(11), 4174-4183, (in Chinese). doi: 10.6038/cjg20171105.
11. Farah, F.O. (2013). "Directional well design, trajectory and survey calculations, with a case study in Fiale, Asal rift, Djibouti." *Geothermal Training Programme*, 27, 27-34. 