

國立臺灣大學理學院地質科學系暨研究所

碩士論文

Department of Geosciences

College of Sciences

National Taiwan University

Master Thesis



高頻地下水位監測系統之設置與地下水位分析

High Frequency Monitoring System of Groundwater

Level and Data Analysis

李佳慧

Chia-Hui Lee

指導教授：賈儀平博士

Advisor: Yeeping Chia, Ph.D.

中華民國一百零二年五月

May, 2013

國立臺灣大學碩士學位論文

口試委員會審定書



高頻地下水位監測系統之設置與地下水位分析

High Frequency Monitoring System of
roundwater Level and Data Analysis

本論文係李佳慧君（學號 R97224209）在國立臺灣大學地質科學系暨研究所完成之碩士學位論文，於民國 102 年 05 月 28 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

指導教授：

曹沁平

口試委員：

徐年豐
邱永嘉

譚義績

誌謝



回顧完成碩士論文的過程中，深切感受到自己的研究之所以能順利完成，是因為我身邊有一群功不可沒的貴人們不斷給我很多幫助，不管是學術上的建議或啟發，或者生活中的關心與陪伴，都在在轉換成讓我繼續完成學業的最佳助力。

首先感謝指導教授賈儀平博士一路以來的指導與教誨，老師對於我的不成熟給予了極大的耐心，而老師精益求精的作學問的態度，以及待人處事的誠懇風範，都讓我獲益良多；同時感謝口試委員徐年盛教授、邱永嘉教授、以及譚義績教授，對我的論文悉心指正，並提供深入的建議與觀點，幫助這篇論文更為完整。

此外，也感謝水文地質研究室每位成員，江小姐平日的關心與照顧，總是及時給予糊塗的我最適當的建議與提醒；在平與伯禹兩位學長，透過一起作實驗或出野外等，不管在學術研究上與生活中都拓展了我的視野；雅嵐學姐不時的真誠鼓勵與關心，總是讓我倍感窩心；慶怡細心、嚴謹的做事態度與方法，都成為我不管是在作研究或平日生活中的楷模，而每當研究遇到瓶頸時，與慶怡討論總能得到我想不到的好點子或想法；而大力幫忙校稿的銘軒以及常常對實驗內容提出實用建議的胤中，幫助我寫論文的過程更加順利；宛真與以馨兩位學妹，在平日研究室生活中總是帶來不少樂趣；而已畢業但還是會不時回來的學長姐們，對於工作經驗的分享或對我們這些學弟妹的關心，都成為我繼續努力的動力。

然後，還要感謝每位在我身旁一路陪伴、打氣的好友們，陽明山小星星的夥伴們、文大地質系的老友們、IN94 家人們，還有怡瑩、晏淋、呆呆、以及從南投跟我回家的九生，因為有你們這群無與倫比的精神啦啦隊，我才能完成這份研究。

最後感謝最親愛的家人們，爸爸、媽媽、老妹、阿嬤，以及在天國的爺爺、奶奶及阿公。

謹將這篇論文獻給我最親愛的家人們，以及每位關心我以及我關心的人。

摘要



台灣的地下水位觀測井遍佈沖積平原與盆地地區，水位記錄通常以時水位為主，少部分監測頻率為分鐘或秒鐘等級。在地下水位記錄中，有時可見不同於降雨、潮汐、氣壓、或地震等自然因素引發的異常地下水位變化，將之與人為活動(例如抽水或停抽)進行對比後，亦無明顯證據顯示此類異常變化與上述因素相關。追蹤異常變化的可能原因後，發現主要與監測系統的設置或運作有關，而且資料錯誤或缺漏呈現多元的型態，容易影響分析結果。本研究嘗試建立一個採用沉水式壓力轉換儀作為核心的高解析度的高頻遠端地下水位監測系統，因此亟需探討地下水位監測系統中，造成記錄錯誤的來源。本研究發現影響水位記錄解析度、穩定度等因素存在於監測系統中的各項環節，例如不當選用沉水式壓力轉換儀的最大承載壓力限度，或者資料記錄器未使用合宜的資料處理模式進行設定等，同時溫度與電壓穩定性亦會影響監測結果，降低水位記錄的正確性，此外監測系統內部的相關搭配元件設置，也會影響地下水位的記錄。於排除監測系統內各種可能影響記錄品質之因素後，本研究將高解析度的高頻地下水位監測系統設置在南投縣社寮國小的地下水位觀測井，以 1Hz 的頻率監測地下水位，解析度為 0.2 公釐，發現社寮的地下水位會對降雨產生即時反應，出現微幅的動態變化，顯示社寮含水層會對降雨引發的地表荷重變化產生反應，含水層因地表荷重改變而產生極為小幅的體積膨脹與壓縮，引發地下水位變化。同時，藉由提升地下水位監測系統的解析度與記錄頻率，監測系統對同震反應的靈敏性亦提升，可以監測地震對自由含水層的地下水位影響，並從而建立一個高解析度的高頻地下水位監測系統所需的背景條件概念。

關鍵詞：地下水位、降雨、荷重作用、監測

Abstract



Groundwater level monitoring wells are densely distributed in the plains and basins of Taiwan. The groundwater level is usually recorded every hour at these wells; only a few wells recorded every minute or every second. After analyzing groundwater level data, we found some abnormal groundwater level changes inconsistent with those induced by natural factors or human activities. These erroneous records may mislead the results of hydrologic analysis or research. This study intends to develop a remote high resolution and high frequency groundwater level monitoring system. It is essential to identify the source of error in the component of the system. It was found that inappropriate setting and installation would cause incorrect groundwater level record, such as exceeding the full scale pressure of the submersible pressure transducer or improper for data processing. The stability of the monitoring environment is also important, such as the consistency of voltage or variation of temperature. After factors might interfere data recording were reduced as possible, the groundwater level monitoring system was installed in Shelia. The recorded groundwater level data indicated that the aquifer is mostly unconfined. And it was found that groundwater level changed in a fluctuation pattern as rainfall occurred, which indicated the loading to aquifer changed due to precipitation and resulted in the compaction and dilation of the aquifer. As promoting the resolution and accuracy of groundwater level monitoring system, the sensitivity to response earthquake rose as well, and a fundamental requirement to a high resolution and high frequency groundwater level monitoring system was also enhanced.

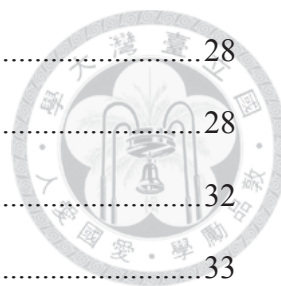
Key words: groundwater level, monitoring, rainfall, loading

目錄



口試委員會審定書.....	i
誌謝.....	ii
摘要.....	iii
Abstract	iv
目錄.....	v
圖目錄.....	vii
表目錄.....	1
第一章 緒論.....	2
1.1 研究動機.....	2
1.2 研究目的.....	4
1.3 研究方法.....	4
第二章 地下水位變化.....	6
2.1 地下水位及其影響因素.....	6
2.2 地下水位監測儀器.....	11
2.3 我國地下水位監測現況.....	14
第三章 地下水位監測系統.....	15
3.1 沉水式壓力轉換儀.....	15
3.1.1 原理與構造.....	15
3.1.2 操作與設定.....	20
3.1.3 資料品質.....	22
3.2 資料記錄器.....	23
3.3 遠端監測與傳輸.....	26

第四章 高頻遠端監測系統.....	28
4.1 系統建置.....	28
4.2 系統設置與改進.....	32
4.2.1 穩定記錄所需時間.....	33
4.2.2 驅動模式.....	35
4.2.3 資料處理速率.....	38
4.2.4 供電穩定性.....	40
4.3 現地監測.....	42
第五章 社寮地下水位觀測井高頻水位變化.....	43
5.1 社寮地下水位觀測井及時水位記錄分析.....	43
5.2 降雨引發含水層承受之荷重改變現象.....	51
5.3 社寮高頻觀測井對地震之反應.....	55
第六章 結論.....	61
參考文獻.....	62



圖目錄



圖 1.1	2011 年 5 月瑞龍站地下水位歷線圖.....	3
圖 1.2	研究流程圖.....	5
圖 2.1	受壓含水層示意圖.....	7
圖 2.2	自由含水層示意圖.....	7
圖 2.3	自由含水層(a)與受壓含水層(b)對應氣壓變化反應示意圖	9
圖 2.4	地下水位記錄與氣溫變化對比圖.....	13
圖 3.1	水位量測示意圖.....	17
圖 3.2	絕對壓力與錶計壓力之關係.....	18
圖 3.3	水頭、深度、壓力水頭示意圖.....	21
圖 3.4	類比數位轉換示意圖.....	24
圖 4.1	本研究使用之沉水式壓力轉換儀與資料記錄器連接示意圖.....	31
圖 4.2	給予水體間歇性震盪以及靜置水體的水位量測結果範例.....	32
圖 4.3	沉水式壓力轉換儀實驗室試驗.....	34
圖 4.4	對比置於同一水體並給予間歇性震盪的一號與二號沉水式壓力轉換儀 水位記錄.....	36
圖 4.5	資料記錄器以快速模式執行，一秒鐘一筆之水位變化量.....	39
圖 4.6	資料記錄器以一般模式執行，一秒鐘一筆之水位變化量.....	39
圖 4.7	本研究所使用的 UPS 備電能力圖	41
圖 4.8	社寮地下水位觀測井現地高頻遠端地下水位監測系統.....	42
圖 5.1	社寮地下水位觀測井之地理位置.....	44
圖 5.2	社寮地下水觀測井所在區域地質圖.....	46
圖 5.3	社寮地下水位觀測井岩心柱.....	47

圖 5.4	2010 年社寮地下水位與彰雲橋站水位歷線圖.....	49
圖 5.5	2010 年 5 月下旬社寮地下水位與彰雲橋站地表水的對降雨反應.....	50
圖 5.6	2011 年 11 月社寮井時水位記錄對降雨之反應.....	51
圖 5.7	2012 年 4 月 18 日秒水位記錄對降雨之反應.....	53
圖 5.8	2012 年 4 月 6 日秒水位記錄對降雨之反應.....	53
圖 5.9	有反應降雨事件與無反應降雨事件對累積降雨事件之佔比分布.....	54
圖 5.10	時水位記錄 2008 年 4 月 25 日同震上升反應.....	56
圖 5.11	時水位記錄 1999 年 9 月 21 日同震反應.....	56
圖 5.12	秒水位記錄 2012 年 4 月 11 日對遠震反應.....	60

表目錄



表 4.1	KPSI735 沉水式壓力轉換儀的物理特性與量測性能.....	29
表 4.2	GG200 資料記錄器的物理特性與量測性能.....	31
表 4.3	本研究之沉水式壓力轉換儀驅動模式的輸入與對應輸出規格.....	37
表 5.1	2011 年 7 月至 2012 年 5 月社寮高頻水位記錄同震反應.....	58

第一章緒論



1.1 研究動機

台灣地區自 1992 年至今陸續建置七百多口分層地下水觀測井，觀測井水位每小時記錄一筆，記錄的精度為一公分。檢視時水位記錄後，可觀察觀測井水位變化，除了受到人為抽水的擾動，也會受到降雨、潮汐、氣壓、地震等自然因素的影響，然而時水位記錄受限於取樣頻率與精度設定，無法完整記錄水位變化歷程細節，其後氣象局於 2002 年陸續建置六甲、那拔、東和、壯圍、鶴岡及其他等高頻地震觀測井，監測頻率提升至秒鐘級，使地下水位細微變化更趨明顯。

然而過去分析地下水位，顯示地下水位記錄不僅反應降雨、氣壓等自然因素以及抽水等人為活動影響，還可觀察到不穩定的異常水位變化，而且變化的形態相當多元，包括資料中斷、逐漸失準或雜訊過大，以及數量與時間均難以掌握的異常脈衝訊號等，以 2011 年 5 月瑞龍站的地下水位變化為例，圖 1.1 顯示地下水位不定時的異常變動，變化幅度可將近 20 公分。此外，即便較新建之觀測井，亦有可能出現類似異常，反映資料記錄的品質(包括精度、穩定度、資料連續性等)，仍受到外在因素影響，並影響研究及其結果之可信度。

以地下水觀測網 2007 至 2008 年之地下水位記錄為例，約 15%的時水位記錄出現錯誤或缺漏，嘗試排除各種人為活動(抽水、停抽等)或自然因素(降雨、潮汐、地震、氣壓變化等)後，顯示影響地下水位記錄品質及正確性之因素可能來自監測系統內部的組件與配置，不當設置將使地下水位記錄無法反映實際水位變化。此外，外在環境改變也會影響監測系統，例如劇烈的溫度變化可能造成儀器失準產生誤差，因此有必要瞭解造成水位記錄錯誤的因素與監測系統之間各個環節的關聯性，分析正確的地下水位變化。

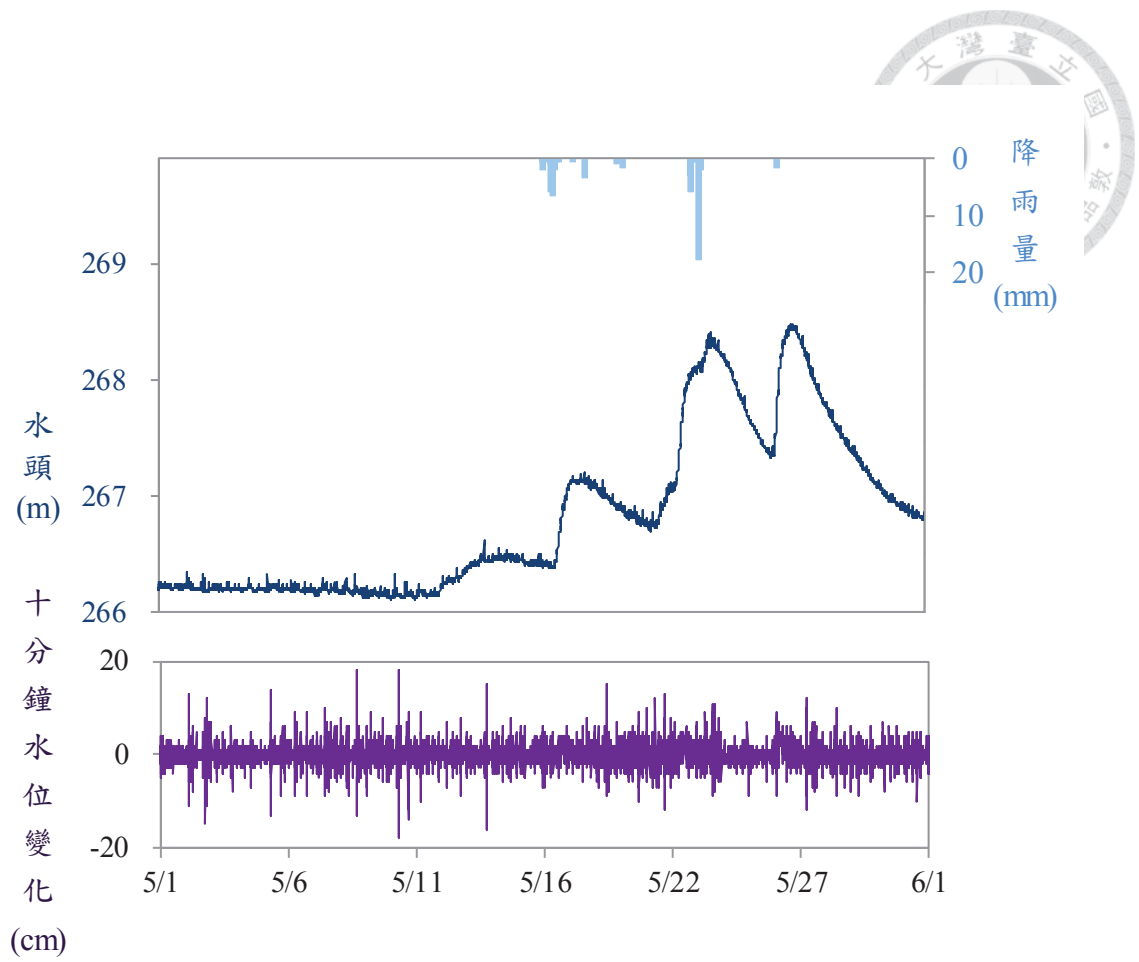


圖 1.1 2011 年 5 月瑞龍站地下水位歷線圖

1.2 研究目的

本研究冀望針對地下水位監測系統的各個環節進行探討，進一步釐清其影響水位記錄之正確性的因素及來源，並建立高解析度的高頻地下水位監測系統，探討地下水位監測系統的建置過程中，可能造成誤差之因素，以利未來檢視台灣地區地下水位變化時，能排除儀器造成水位記錄錯誤的可能性，建立更明確的水位異常檢視標準。除此，於排除監測系統各種可能影響資料正確性因素後，本研究建置遠端監測系統於南投縣的社寮地下水位觀測井，判釋該井的地下水位變化，並分析社寮地下水位觀測井水位之細微變化與自然因素之相關性。

1.3 研究方法

本研究首先評估適於高頻遠端即時監測系統的儀器設備，進行沉水式壓力轉換儀與資料記錄器之精度、解析度、輸出與輸入規格、量測頻率等參數條件的分析與對比；其後於實驗室內建立測試系統，模擬井孔內地下水位變化，測試各種不同參數設定對水位記錄之影響，分析水位記錄之穩定與精確度，探討水位變化經感應器進行感測、轉換、傳輸、至輸出後的過程中可能的誤差來源，並將之予以排除。此外，蒐集社寮地下水位觀測井之地質資訊，並檢視 1997 年至 2012 年時水位記錄，嘗試濾除抽水、洗井等潛在人為因素，交叉比對降雨、大氣壓力等變化，分析短期與長期水位異常變化，篩選社寮地下水位觀測井特定之水位變化模式與特徵，釐清含水層主要特性。高頻即時監測系統設置完成後，針對監測期間水位記錄判釋其資料收錄狀況，瞭解該井的地下水位變化特性以及在低頻記錄中無法觀察到的特殊水位變化。研究方法流程見圖 1.2。

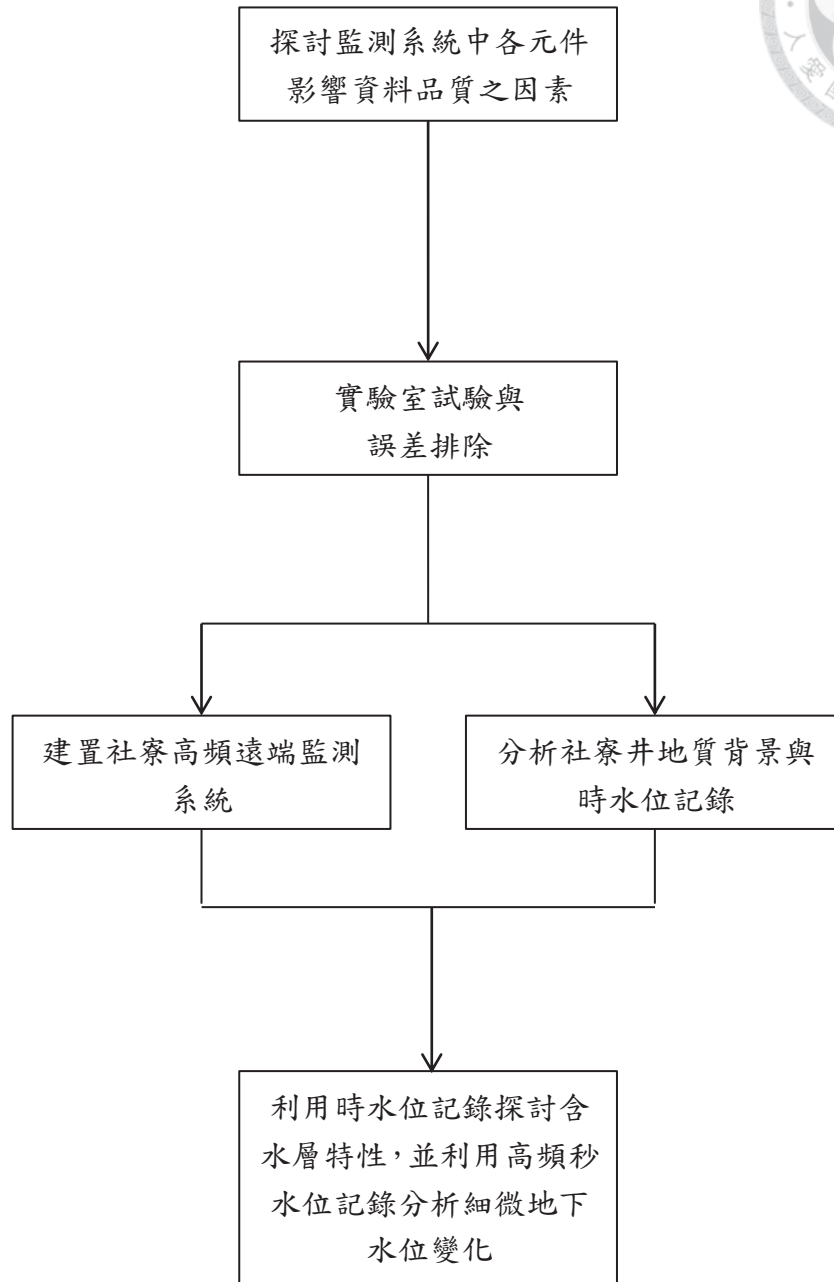


圖 1.2 研究流程圖

第二章 地下水位變化



2.1 地下水位及其影響因素

地下水之定義，狹義者僅討論地層中飽和帶的孔隙水，廣義者則論及地表面以下所有的水，包括未飽和帶的水，一般討論地下水位變化時主要依循前者。地下水面又稱自由水面，為地下水飽和帶孔隙水壓為大氣壓力之界面。然地層中飽和帶受地質材料之構造、組織、成分等因素影響，可進一步分為受壓含水層(confined aquifer)(圖 2.1)與自由含水層(unconfined aquifer) (圖 2.2)。因此當論及地下水位(groundwater level)時，其代表意義與地下水面(water table)不同。

受壓含水層上下邊界與阻水層(aquitard)或難透水層(aquiclude)相接，阻水層的低滲透性使其內部地下水流動可忽略(Maxey, 1964)，並阻滯地下水的垂向流動，因含水層上緣承受其上阻水層壓力，該面承壓與大氣壓力不等，不能稱之自由水面；若鑿井穿之，則會使受壓的地下水沿井管垂向移動直到井水面與大氣壓力達平衡之位置，該水面則稱受壓水面(piezometric surface)，以深度或高程的概念描述之即為所謂的地下水位(groundwater level)。而自由含水層上方則覆蓋相對透水性較高之地質材料，大氣透過孔隙與含水層上界相連，因此具有與大氣相通之地下水面，一般地下水位之監測主要針對井水位變化，對於自由含水層而言即為地下水面。

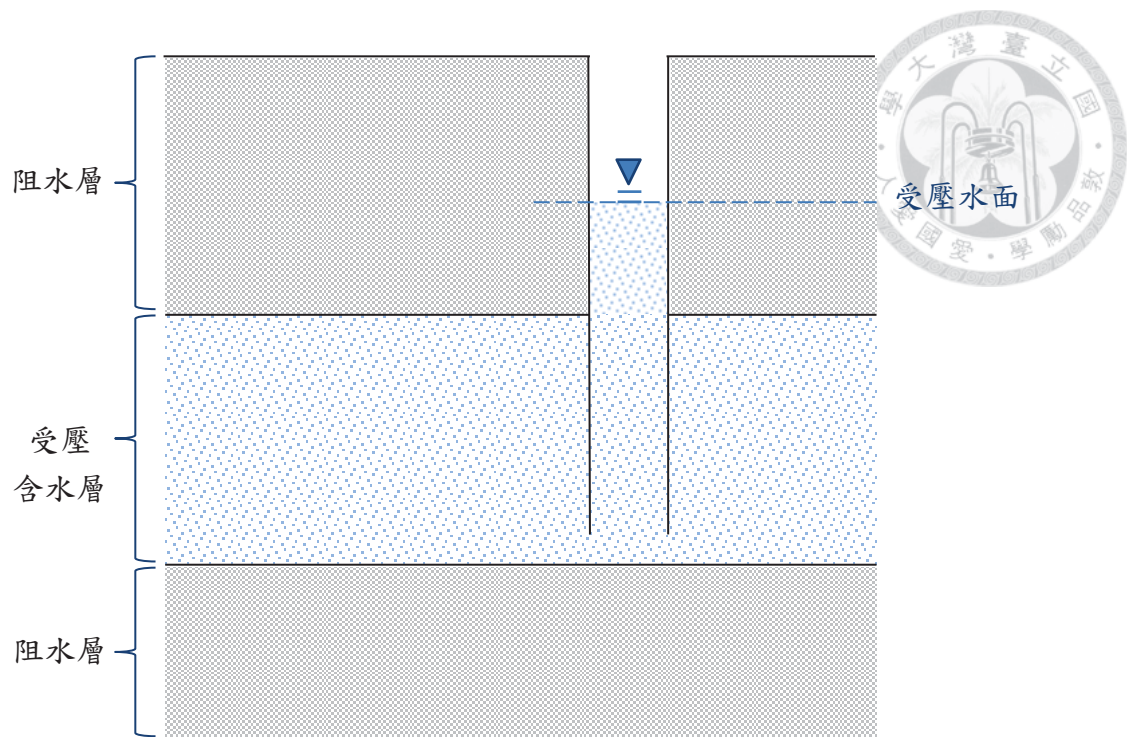


圖 2.1 受壓含水層示意圖

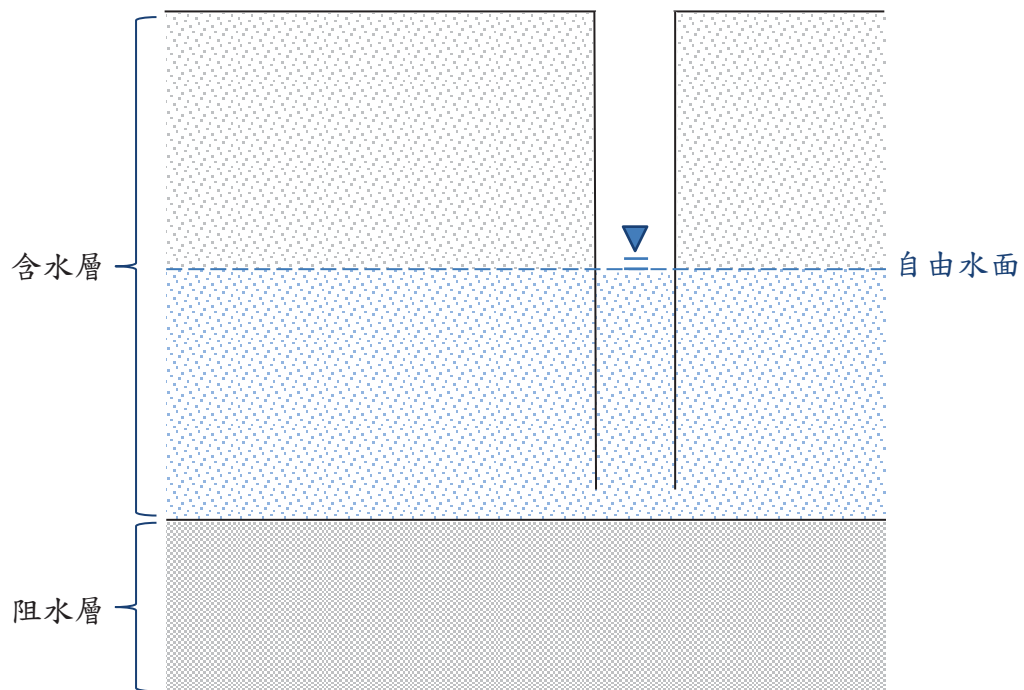
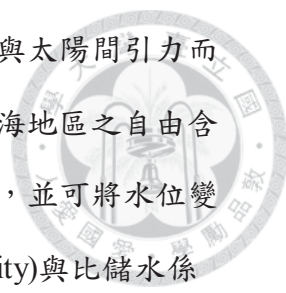


圖 2.2 自由含水層示意圖



地下水位之變動受諸多因素影響，其一為來自地體受月亮與太陽間引力而產生的海潮(ocean tide)與固體潮(earth tide)作用。海潮作用對近海地區之自由含水層影響較為顯著，地下水位對應潮汐產生周期性的變化趨勢，並可將水位變化數據應用於計算該受壓含水層之導水係數(hydraulic conductivity)與比儲水係數(specific storage) (Carr and Van Der Kamp, 1969)。固體潮作用可使含水層內孔隙水壓產生週期性的升降變化，導致地下水位產生垂向位移變化(Blanchard and Byerly, 1935)。一般而言，受壓含水層受固體潮影響相對較明顯，係因在將天體引力視為大尺度作用力的前提之下，得以小尺度概念考量含水層，亦即含水層內各點所受引力可視為均勻相等，故可忽略含水層內橫向不同水力梯度之區域所受引力影響的變化差異。在此基礎下能將受壓含水層視為無法排水的彈性水體，具有低出水度(specific yield)，因此受潮汐引力時產生之體積膨脹與壓縮反應也較自由含水層明顯，而引發之地下水位變化幅度則另由地下水與地質材料本身之壓縮性主導(Narasimhan *et al.*, 1984)。

氣壓是地下水位變化另一影響因素，受壓含水層與自由含水層為不同性質的地質單元，兩者反應模式亦不相同。自由含水層的氣壓反應，因氣壓變化直接作用於井水面，間接作用於井外含水層上方交界面，此因素使兩者之間存在壓力差，使地下水位產生相對變動，空氣隨氣壓變動而移動並進出自由含水層上方的未飽和帶，對自由水面產生間接影響(Buckingham, 1904)，自由水面的變化程度受控於未飽和帶的厚度、地質材料之滲透性等因素，並且終將與大氣壓力達平衡，故地下水位會隨時間回復到原本位置(Weeks, 1979)(圖 2.3a)；當受壓含水層反應氣壓變動時，上層的阻水層立即將來自地表的承壓變化直接傳遞至與含水層相接的交界面，部分壓力由水體與地質材料吸收，抵銷後的壓力即經由地下水位反應(Jacob, 1940)，因不似自由含水層可由較高滲透性之未飽和帶隨時間調節此壓力差，受壓含水層之地下水位對應大氣壓力變化會持續反應，且水位變化的型態會與大氣變化型態相似(圖 2.3b)。

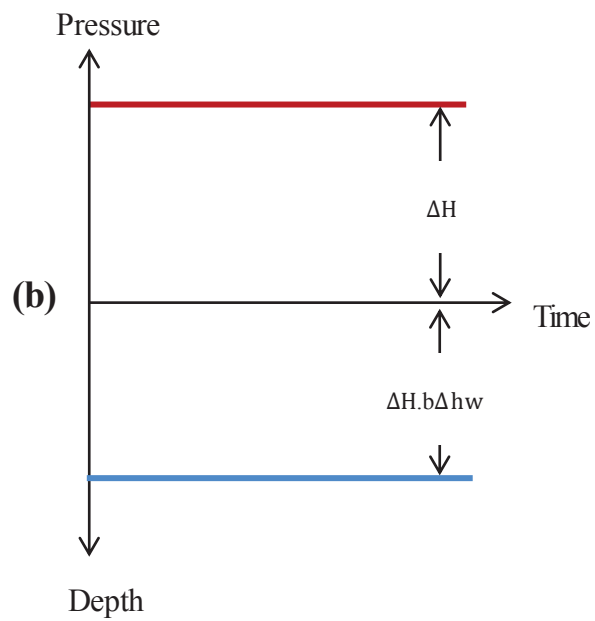
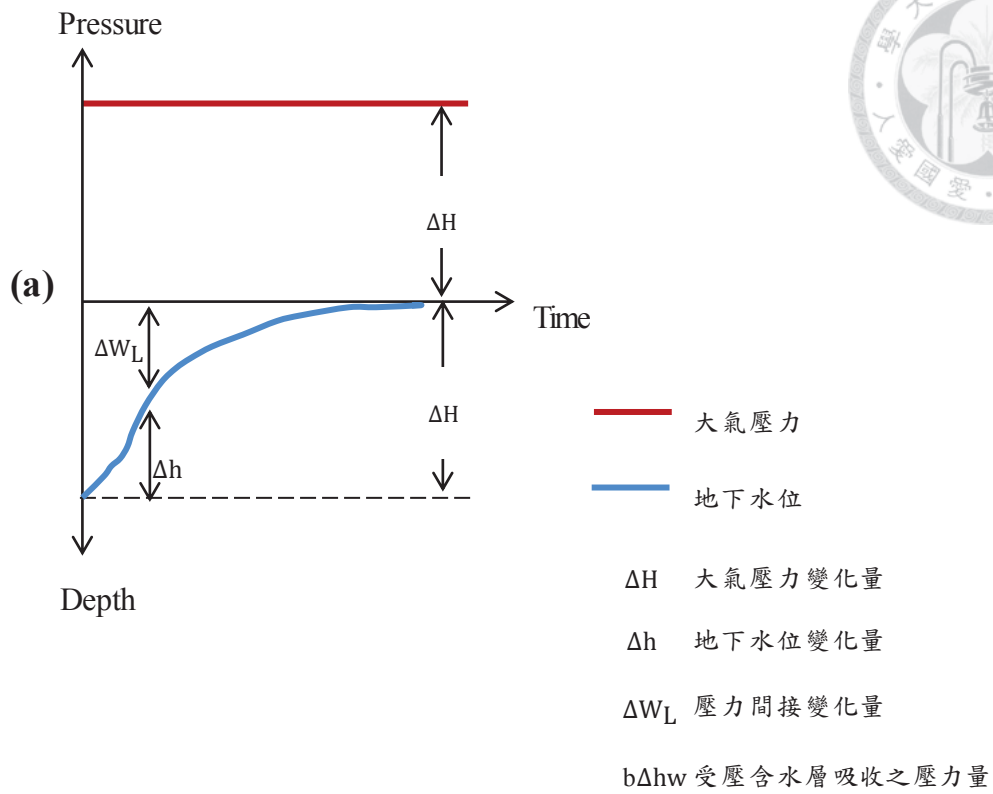


圖 2.3 自由含水層(a)與受壓含水層(b)對應氣壓變化反應示意圖(修改自 Weeks, 1979)

降雨也是地下水位變化之主要影響因素，降雨形成地表逕流並匯集至河流，期間受重力沿土壤及岩石空隙滲入地下，並影響含水層所承受的地表荷重作用。地下水面起伏形態會與地形變化相近(King, 1899)，而降雨對地下水位之影響幅度則取決於地表地質水文及條件，最終呈現的地下水位反應該含水層承受的荷重變化以及補注(recharge)與排水(discharge)平衡後的結果。Igarashi 與 Wakita(1991)曾觀察到地表下 500 公尺的受壓含水層，受降雨產生彈性應變，此外 Sophocleous 等人(2006)亦曾測試地表下 300 公尺的受壓含水層，在一次降雨量 86 公釐的降雨事件中，井中水位出現明顯明顯的變化訊號反應降雨的荷重作用。

除上述影響因素之外，尚有人類活動等因素會影響地下水位；人為抽水與工程開發均會影響地下水位變化，例如 1950 至 1970 年代期間台北盆地的大規模開發超抽地下水造成水位過低，進而引發地層下陷(吳建民，1970)，另外板塊活動引起之地震震波傳遞亦會造成地下水位之變化(Cooper *et al.*, 1965)，其影響因素又可進一步分開討論含水層類型、儲水係數、滲透性等項目；此外，1985 年美國加州 Parkfield 附近地區 2 口觀測井亦觀察到震前與同震變化(Roeloff and Quilty, 1997)。地下水位反映該含水層與當地區域應力分布、地形起伏，人為活動與降雨、氣壓等氣候因素相互作用達平衡之呈現結果，故地下水位之變動分析往往需考量多項因素。

2.2 地下水位監測儀器



地下水位量測技術隨著時間推移演變出數種量測設備與方法。早期使用鐵捲尺進行地下水靜水位量測，捲尺表面附有刻度，接近末端部分有藍色粉筆或遇水即能變色之物質予以註記，將其置入井孔，觸及地下水面後取出，依其刻度出現色差之位置，來辨識地下水位深度，量測深度可達 300 公尺以上(Everett, 1981)。其後結合電子設備，於捲帶側緣設置導線，底端感測器感應到水位後回傳訊號，並以聲響或燈光提示，此量測法適於水力梯度較低之靜水位，因測得的資料僅表示單一時間點的水位深度，無法完整指示含水層的水位變化，含水層可能因潮汐、人為抽水、工程、降雨、或氣壓變化等因素，造成地下水位產生尺度不一的變化，干擾水位記錄。

鐵捲尺於量測過程中受重力拉張，經一定時間與使用次數後，刻度間實際間距會大於捲尺上標示的間距。此外，量測深井有時須多次探測深度，以避免捲尺的長度不足或沒入水中過深，導致無法讀取刻度。手動式的鐵捲尺無法量測連續性的水位變化或同時監測數口地下水井，對於長期監測偏遠地區之地下水位變化有其難度，因此能連續記錄水位變化的自記式水位計隨之出現。其一為沉水式壓力轉換儀(submersible pressure transducer)，約自 1960 年代開始使用(Gaber and Koopman, 1968)，原理為利用電子元件感應水壓，使電容、電阻、或電壓隨之改變，機械能轉換為電能，記錄水位變化。隨著半導體產業的發展，沉水式壓力轉換儀越趨進步並且更廣為使用，詳細部份於第三章討論。

另一種是浮筒式自記水位計，係利用浮筒隨水位垂向位移帶動纜線及其上轉輪，使儀器內電位計感應產生電位差，進一步將電位變化轉為水位變化記錄，浮筒式水位計之靈敏度受浮筒與井壁間的摩擦力影響，不適於短時間內水位變化幅度較大之水井，小口徑井管亦會增加其摩擦阻力(Rosenberry, 1990)，適用於管徑四吋以上、水位變化趨勢較平緩之水井，量測主要限於深度 100 公尺以

內，較不利於監測潮溼環境或鹽化之地下水質，並且僅適於垂直之井管。

另有部分供水量大的水井會選擇使用送氣管(air line)量測水位，藉由將金屬製的小口徑通氣管線設於井中，管內水位與井水位相通且等高，其上利用送氣閥將空氣送入管中，排除位於管中之地下水，並以壓力計量測排除管中所有水所需之壓力值，進而代表井水深度，這種量測法常見於工業或民生用井，其精度約介於 ± 3 公分，無法提供較高頻且高精度之水位變動資料。此外，尚有超聲波水位計(acoustic water level meters)，係透過利用聲波反射原理量測水位變化，較不適於高水位之地下水井，其精度約介於 2 至 4 公分，多應用於地表水監測，較少應用於地下水位測量。

目前台灣多使用在潮濕環境或腐蝕性地下水具有較高耐用性的沉水式壓力轉換儀。隨著沉水式壓力轉換儀被廣泛使用，量測方式與改進陸續被討論，Gaber 與 Koopman(1968)在美國內華達州試驗場址將高靈敏度的沉水式壓力轉換儀應用於水力梯度極低且深度介於 1000 至 2000ft 的含水層，並系統化探討地下水位量測的步驟、定期的人為校正與儀器各種參數的瞭解與對照。此外，量測儀器以外的誤差來源也進一步進行瞭解，識別來自儀器本身的誤差，例如含水層與阻水層兩者與井管設置的相對位置亦會影響水位記錄(Isaac, 1970)。

造成誤差之因素同時可能來自與資料記錄器搭配量測的組件，1983 年美國堪薩斯州境內進行地下水位量測，探討通氣帶與飽和帶之相互關係，沉水式壓力轉換儀用於感測大氣壓力與地下水位變化，並觀察到將之結合資料記錄器後，兩者之間的電壓分壓器受溫度變化影響，水位記錄產生週期性的起伏導致日水位變化的誤判(圖 2.4)，必需針對輸出與輸入電壓的設備進行調整(Sophocleous and Perry, 1984)。

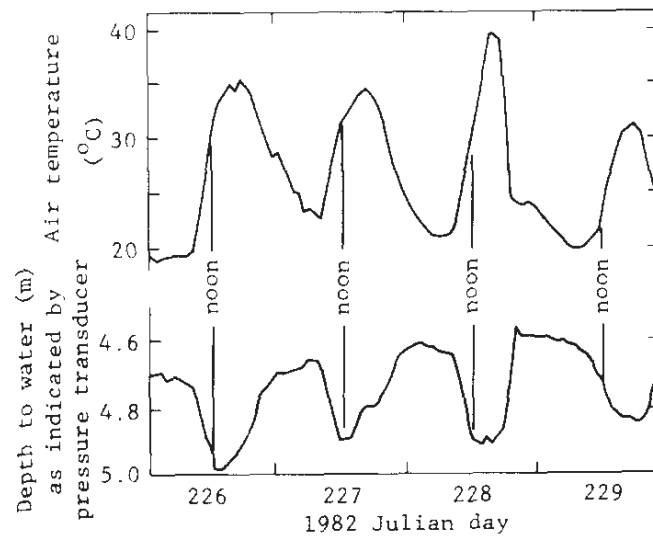


圖 2.4 地下水位記錄與氣溫變化對比圖(Sophocleous and Perry, 1983)

Rosenberry(1990)在美國新罕布夏州放置六個沉水式壓力轉換儀，對地下水位進行為期 15 個月的監測，發現沉水式壓力轉換儀感測的地下水位紀錄於監測期間產生近 3 公分的飄移誤差，不屬於實際地下水位變化，排除其他可能誤差來源，諸如溫度變化導致輸出訊號誤差或供電電壓改變等可能性後，認為主要誤差來源為感應器本身的零點參考點飄移。

沉水式壓力轉換儀亦被應用於監測地下水位變化與地震之間的關係，記錄地下水受震波或大地應力重新分佈造成的短時間變動(O'brien, 1992)。此外也陸續應用於地表水位的量測，Endale 等人(2010)進行為期兩年的試驗，使用沉水式壓力轉換儀搭配資料記錄器來觀察溪水流量的變化，並定期另行人工測量流速搭配校正。

2.3 我國地下水位監測現況



自 1950 年台灣由台灣糖業公司取得來自美國的 Johnston International 公司的鑽探技術後，地下水背景得以被更廣泛的調查與開發(張建勛，1955)。1958 年台灣省地下水工程處開始於多處沖積平原與盆地地區探勘地下水資源(汪中和等人，2004)，1959 年陸續建置地下水觀測井，至 1966 年已完成 300 口觀測井；1970 年代隨著地下水抽取量逐年增高，陸續進行地層下陷相關之地下水調查與監測，至 1987 地下水觀測井擴增至 339 口，其中 37 口為自記式觀測井。1986 年美國地質調查所 Holzer 博士受邀來台，建議建立地下水觀測系統蒐集資料(Hsu, 1998)，促成行政院經建會於 1990 年通過「台灣地區地下水觀測網整體計畫」，並於 1992 年執行。

1992 年由經濟部水利署與中央地質調查所主導為期 17 年的台灣地區地下水觀測網建置計畫，使新一代觀測井遍布台灣各地，涵蓋台北盆地、桃園地區、新苗地區、濁水溪沖積扇、嘉南平原、屏東平原、蘭陽平原、以及澎湖群島等區域，廣泛觀測地下水位與地下水質，地下水位的監測頻率以時水位記錄為主，2002 年氣象局陸續增設六口秒鐘級觀測井，分別為花蓮、壯圍、那拔、六甲、東和、赤山，2007 年經濟部中央地質調查所亦啟動山區地下水資源的調查與研究，長期以來累積大量地下水位監測資料。

地下水位量測方式於 1950 年代期間主要人工定期前往現地測定，此時量測儀器使用鐵捲尺進行量測，因其不利於連續性量測或遠端監測，量測頻率以一月一筆。1980 年代以後監測方式漸轉為使用自計式水位計，使用類型包括浮筒式與壓力式，期間調整並汰換舊有自記式觀測井，包括浮筒式水位計由使用記錄紙轉為數位記錄、壓力式水位計轉為沉水式壓力轉換儀，以降低不可控制的環境因素對水位變化之影響。現今目前我國地下水位監測已建立相當密集的監測網，並逐漸延伸至以往較少探討的山區地下水之研究。

第三章 地下水位監測系統



以壓力式水位計為主要感測元件的地下水位量測系統包括符合研究需求規格之沉水式壓力壓力轉換儀，電路傳輸與資料傳輸能力完善的傳輸電纜、可負載大量資料的資料記錄器處理器，以及遠端即時監測系統。現今沉水式壓力轉換儀的精度和解析度等已相當精進，與資料記錄器整合之後，可收發數月至數年之資料，甚至可前端處理地下水位變化資訊，經選定適當之遠端傳輸途徑，即可不須到達現地也能長時間監測地下水位變化。而建立遠端地下水位監測系統，需對各量測儀器與相關組件有相當了解，避免可預期之儀器相關誤差，以利正確解釋水位變化於水文地質之意義，故於本章細部探討監測系統各關鍵環節。

3.1 沉水式壓力轉換儀

3.1.1 原理與構造

壓力轉換儀屬微機電系統(micro.electrical.mechanical System)(林子平，2004)，其內部傳遞電子訊號之組件體積為微米(um)等級，基本原理為利用電子元件受壓，產生形變後會使輸出電壓與輸入電壓出現差異的物理特性，將機械能轉換為電能，並可將產生的電壓變化視為代表此轉換儀所在處之壓力值，其中應變儀式(strain.gage pressure transducer)為較常見之類型，並應用於本研究使用的沉水式壓力轉換儀(submersible pressure transducer)。

沉水式壓力轉換儀屬於電阻式轉換儀的一種，主要利用壓阻原理進行量測。壓阻材料受壓產生變形，電阻值隨之改變，並產生垂直電流方向的電壓差(Bridgman, 1925)，當電路的輸入與輸出造成輸出電壓出現相對應變化，電阻值

的變化量可轉換為壓力讀值，屬於被動式的壓力轉換型態。

電阻式壓力轉換儀依其核心元件的結構不同，可大致分成電阻線型、金屬薄片型，以及半導體型三種類型(Lawrence *et. al*, 1984)，其中核心元件的表面積可達 2 平方公釐以下，厚度可達 0.2 微米以下(Clark and Wise, 1979)。

電阻線型的核心元件係將極細的導線以柵欄狀的幾何形狀排列組成，目的為增強電阻，上方覆蓋保護用的薄層材質後固定於絕緣隔膜上，兩端連接電路引線組成感應元件。金屬薄片型則將金屬薄片以蝕刻方式製造不同幾何形的之柵欄狀刻痕，即構成一完整壓阻感應元件。半導體型的核心元件則利用半導體製程將矽製成圓形的半導體薄膜，表面以擴散法(diffusion)將摻質(doping)原子滲入半導體中(Tufte *et. al*, 1962)，膜片邊緣製造四個壓電阻並以金屬線連接，組成惠斯頓電橋藉此感應壓力的變化，膜片的一側為連接測量端的高壓腔，另一側則為與大氣相連或封閉成真空之低壓腔，當膜片因兩側壓力出現差異並產生形變後，其應變造成電阻改變，使輸出電壓隨之相應變化，故輸出壓力值可反映反映膜片所承受壓差。現今最為常見之壓力轉換儀即為矽半導體式。而膜片的曲率、厚度等特性，決定壓力轉換儀的靈敏度，並進而影響最大承載壓力限度(full scale)以及精度、解析度等儀器的先天能力。

沉水式壓力轉換儀整合壓力感應儀與記錄器，能直接置入水面下量測水位之壓力式水位計，能用於量測地下水與地表水水位，亦有用於量測孔隙水壓力之研究，常直接稱為水位計或水壓計。用於量測井水位時，需將之置於指定深度，未經大氣壓力校正地沉水式壓力轉換儀，其量測值代表其上水柱壓力與大氣壓力之總和(圖 3.1)。



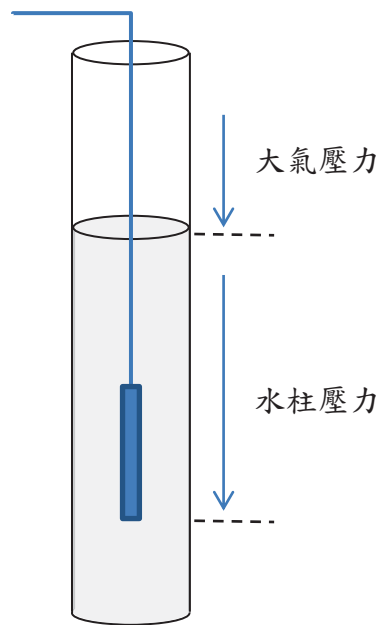


圖 3.1 水位量測示意圖

將地下水與大氣視為流體之前提下，流體壓力的量測可分成四種討論，四者的量測原理略有不同，在解讀沉水式壓力轉換儀的量測數據時，各具不同的特定表示法與物理意義，有瞭解其意義之必要，以下分開敘述，分別為絕對壓力、錶記壓力、差異壓力，以及封閉壓力。

1.絕對壓力(absolute pressure)：以絕對真空為基準點進行量測之壓力，代表流體分子運動所造成的實際壓力讀值，換言之，完全無壓力時 P_{abs} 為零。因此用 psia 式的壓力轉換儀量測大氣壓力時， P_{abs} 會顯示為 14.7 psia(或接近此值)，係因壓力轉換儀內部的壓電薄膜一側為真空，另一側則與至大氣相連所致。絕對壓力恆為正值，單位常見以 psia 表示(圖 3.2)。

2.錶計壓力(gage pressure)：以平均海平面之大氣壓力為零點壓力，代表相對值，因此海平面以上的錶計壓力顯示為負值，反映大氣壓力隨高度遞減。較常見的單位以 psig 或直接以 psi 表示。一般而言，海平面之大氣壓力值為 $1\text{atm}=14.7\text{psia}=0\text{psig}$ ，因感壓膜片兩側壓力相等，其與絕對壓力間關係式為

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{gage}} + P_{\text{atm}}。$$

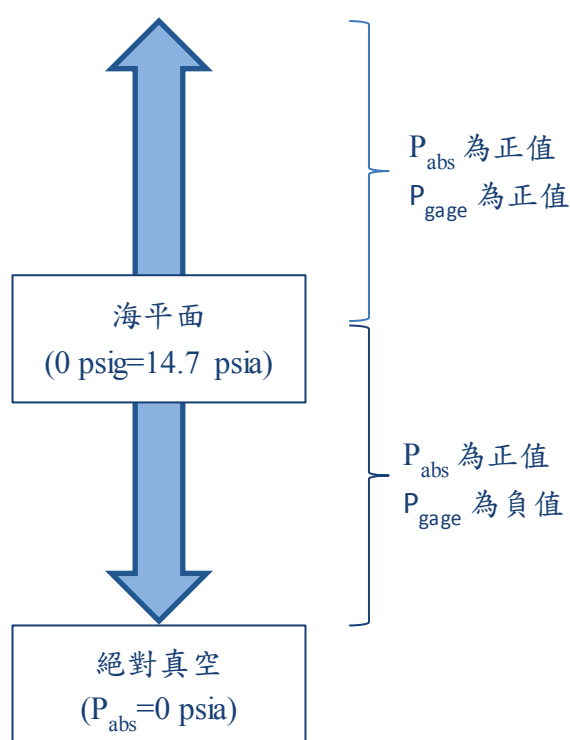


圖 3.2 絕對壓力與錶計壓力之關係

3.差異壓力(differential pressure):以一特定壓力來源為參考基準點進行量測,例如周圍大氣壓力,此壓力基準可具變動性,因此實際量測值為兩個獨立壓力來源之差異,例如通氣式(vented)沉水式壓力轉換儀,其量測值為轉換儀上方承受之總壓力與大氣壓力之差。在相當深度下,差異壓力式轉換儀的使用有時可被封閉式取代,因其隨溫度變化產生之量測誤差已進入可接受範圍內

4.封閉壓力(sealed.reference pressure):透過減壓(使真空)或施壓於感壓零件,使其封閉並內建一絕對壓力值,常見以 psis 表示。若將一大氣壓力封於封閉式轉換儀中,其大氣量測值將接近 0psis,此因實際大氣壓力會隨著時間微幅變動。因感壓薄膜一側置有固定體積之氣體,故溫度變化對封閉式壓力轉換儀有重要影響。

沉水式壓力轉換儀之量測大致以錶記壓力為表現方式,並進一步分成通氣式與非通氣式。通氣式應用差異壓力原理,於電子終端設置小口徑通氣孔洞,並使其電纜線連接,通氣口設置多孔隙的不鏽鋼圓片以濾除有害的空氣粒子進入轉換儀,使轉換儀內部感壓膜片能分別感應一側的大氣壓力與另一側的大氣壓力與水柱壓之和,相抵之下即能僅量測研究所需之水柱壓;非通氣式則應用封閉壓力為量測原理,內部封入真空,故量測值代表大氣壓與量測點上方之水柱壓總和。

3.1.2 操作與設定



沉水式壓力轉換儀之操作與設定需考量研究目的與現地狀況，轉換儀直徑一般介於 1 至 2 公釐，適於 2 吋井徑以上之觀測井。其外殼材質多為白銅或鈦鋼，外殼本身可承受壓力與撞擊予以保護作用，但其內部屬精密儀器，自井孔取出與置入時均須謹慎操作避免撞擊，產生之壓力與震動會進一步造成機械疲勞破壞，並導致整體結構之間的不穩定。

沉水式壓力轉換儀應安裝於一固定的穩定懸掛點，並垂放至適當深度，該深度應為井水位最低季節變化範圍以上，以確保旱季最低水位時仍能確實記錄地下水位變化，並置於該轉換儀最大承載壓力範圍以內，亦即圖 3.3 中標示壓力水頭之範圍，避免承壓過高。此外，因訊號強弱與傳輸電纜線長度呈相反對比關係，纜線越長訊號強度越弱，故選擇可設置之深度範圍內時，仍不宜放置過深以免影響資料品質。如遇該地有不同深度之含水層，並設有兩口以上不同水頭高之觀測井，則兩口井放置深度亦須隨之分開考量。轉換儀之懸掛與連接方法之一為使用電纜直接將轉換儀與資料記錄器或電腦連結，並避免地下水滲入儀器內部造成資料誤差甚至損壞，此要項適於須即時監測地下水位變化者；另一方式為以盲栓上鎖，繫以尼龍繩或鋼繩懸掛於井孔內指定深度，定期取出收取資料。地面設置部分，若轉換儀於地面與資料記錄器或電腦連接，需設置防潮、防濕、防蟲等保護，常見另設置保護用外箱或簡易庇護小屋。

沉水式壓力轉換儀於井水位的量測常見以壓力水頭(pressure head)表示(圖 3.3)，其意義代表量測點以上之水柱高；若計入某特定基準面合併高程計算，則稱水頭(hydraulic head)，一般以平均海平面為基準；另一種標示法以深度表示，代表地表往下至井水面之距離，有時以靜水位(static water level)討論之，各表示法具有其特定意義，若混淆則會造成水位解釋的謬誤。

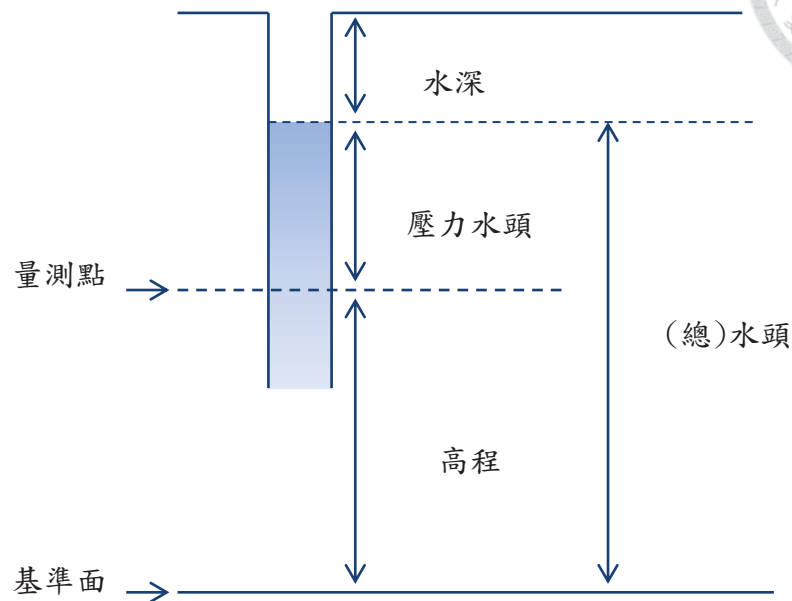


圖 3.3 水頭、深度、壓力水頭示意圖

量測頻率之設定依研究目的而有所不同，常見記錄頻率可分日水位、時水位、分水位、秒水位記錄。早期自計式水位計尚未普遍使用時，多已人工方式量測瞬時水位，並因交通或人力配置因素每日定時量測以代表當日的地下水位變化，現今已相對較少見此種型態的日水位記錄；時水位記錄較常見於長時間的地下水位監測，例如現今台灣地下水觀測網即主要以此頻率量測，測得的水位變化反應量測當下的瞬時水位；分水位與秒水位記錄適於較短時間或特殊目的之研究，例如數小時或更短時間之水力試驗，便於短時間內密集觀察水位洩降變化，探討地下水位與地震相對應關係之研究，測得的較高頻之秒鐘或分鐘級瞬時水位亦可進行平均運算供研究者使用。另外其他設定還包括各參數使用單位、地下水預設密度、即時顯示之時間範圍以及尺度等，現今大部分可預先設定。

3.1.3 資料品質



沉水式壓力轉換儀可以依照指定的量測頻率連續記錄地下水位變化，記錄到的地下水位資料之連續性與穩定性對於研究結果有相當大的影響力，資料的中斷、異常的位移、或者出現不規律的異常峰值，都會影響對水位變化因素的判釋。影響水位記錄品質並導致資料中斷或錯誤的可能因素相當多種，供電穩定度、資料記錄器掃描頻率、水位記錄的頻率、環境溫度、水壓等都可能產生影響，這些因素對於資料品質的影響情形皆需被明確的瞭解。

此外，各種資料的參數，解析度、精度、精確度等，均具有其特定物理意義。解析度(resolution)係指兩筆量測資料間所能量測到的最小差異，換言之，兩資料量測點之間其差值必為解析度之整數倍；精度(accuracy)係指測量的平均值與實際值之差，若每次測量讀值均趨近真實數值，則稱為高精度，表示法分絕對誤差表示法以及相對誤差表示法，其中後者較廣為所用：

絕對誤差： $E = \bar{X} - X_i$

相對誤差： $E_r = \frac{E}{X_i} \times 100\%$

其中 $\bar{X}$ 為量測平均值， X_i 表示時間為 t 時之量測值；精確度(precision)代表多次量測或計算後得到的結果的一致程度，可以分成利用標準差(standard variation)、變異(variance)、以及變異係數(variance of coefficient)等不同方式計算求得。而對於高頻地下水位記錄的分析而言，良好的解析度與精度極為重要，因此在地下水位監測系統的規劃與建置階段，這些因素都需要被仔細考量。

而當資料品質出現顯著下降的時候，可針對該次異常水位變化與前後水位變化趨勢進行對比，並同時探討環境的外在因素與監測系統的內部因素，進而進行校正。



3.2 資料記錄器

整合沉水式壓力轉換儀與資料記錄器的地下水位監測系統中，轉換儀與資料記錄器均有各自的精度、解析度、以及量測頻率等不同參數的設定，但其扮演的角色與意義截然不同。前者負責將水位變化由機械能轉換為電子類比訊號，指儀器本身量測現地地下水位之最大極限的仔細程度與正確度，而後者將來自前者的類比訊號轉為數位訊號，代表針對來自前者之量測資料的二次階段處理能力，舉例而言，高解析度的沉水式壓力轉換儀搭配低掃描頻率的資料記錄器，呈現的資料反而相對粗糙，無法如預期的精確呈現細微的地下水位變化。地下水位的記錄反映的是兩者合併處理資料後的結果，因此於本節另行進一步討論資料記錄器之原理與特性。

資料記錄器為獨立設置於地表的儀器，常見以儀器箱或簡易建築物保護，設置方法可分為地面式與地下式，一般內含類比數位轉換(Analog to digital converter, ADC)、全球定位系統(GPS)，以及網路連接與傳輸介面等部份。概略運作過程為將感測得到的類比訊號轉換為數位訊號，經全球定位系統校時後，將資料進行儲存與備份，依研究目的進行線上分析或處理後，經由指定網路介面傳輸至遠端接收端。資料記錄器內部類比數位轉換儀為最主要影響資料處理結果之元件(Walden, 1999)，諸如其採樣頻率、解析度、訊號處理速率等設定參數，皆會影響水位變化記錄的記錄結果。

類比數位轉換器可將屬於連續性時間(continuous time)的類比訊號，轉換為由 0 與 1 代表離散時間(discrete time)的數位訊號(David and Wiley, 1994)，當溫度、壓力、聲波等物理參數隨時間變化時，透過感測元件(壓電晶片或電阻式應變儀)，機械能轉換為電能，類比訊號改以電壓或電流值表示，轉換為二進制編碼後的數位訊號，理想狀況下等同於類比訊號等比例放大後之訊號，圖 3.4 為類比數位轉換示意圖，類比訊號(圖左)以實線表示，轉換後之數位訊號以直條

圖表示(圖右)，虛線表示類比訊號變化趨勢，各直條線間距反映採樣頻率。

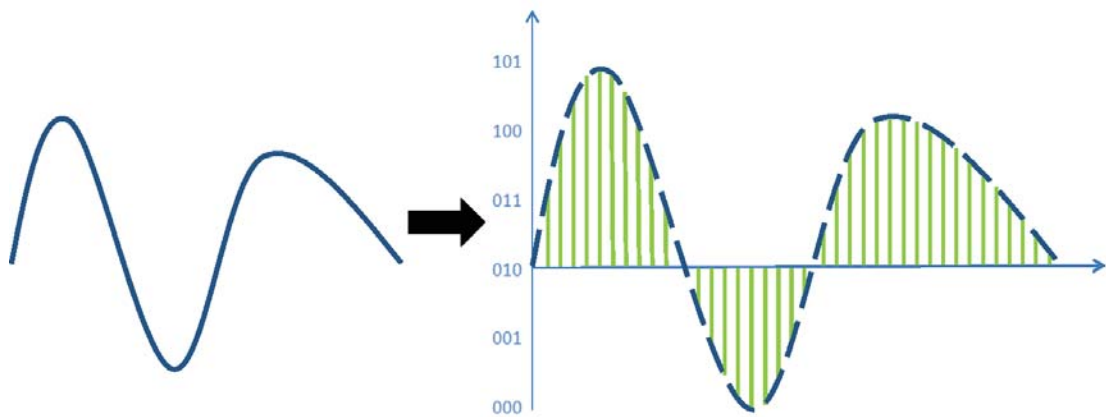


圖 3.4 類比數位轉換示意圖

在時域中呈連續變化的類比訊號，截切後轉換為不連續的資料區間 (interval)，其分割頻率之依據稱為採樣頻率 (sampling frequency) 或採樣率 (sampling rate)，表示數位訊號採樣自類比訊號之頻繁程度，並決定轉換後數位訊號連續性的完現程度，越高則越能完整呈現物理參數變化。

類比訊號垂向振幅的變化分析受制於 ADC 本身之位元數大小，類比訊號會的振幅依照 2 的指數進行分割，而指數的大小則由位元數決定，因此 ADC 的位元數越大，分割後的數位訊號其垂向變化的細緻程度越明顯。分割後之最小單位即代表資料記錄器本身的取樣解析度 (sampling resolution)，以二進制表示，由 1 與 0 組成，單位為位元。

訊號值進位至下一個數值的意義反應訊號變化是否有大於最小位階電壓 (least significant bit, LSB)，代表觸發數位訊號進位至下一個階段所需輸入的最小值電壓，低於 LSB 之電壓變化無法觸發進位，無法記錄於數位訊號中，故一般直接使用 LSB 討論 ADC 的解析度。

理想狀態下，ADC 轉換的輸入與輸出訊號大小呈線性比例，但是轉換過程中存在著必然的誤差，造成類比/數位訊號的實際轉換函數與理想轉換函數出現差異。一般而言，影響 ADC 轉換之精確度的因素可以分為數種誤差(Staller,

2005)，當輸入電壓未大於最小位階電壓，數位輸出編碼便無法進位到下一個位階，導致電壓變化未被記錄，便會產生量化誤差(quantization error)，這些截切後未被數位訊號呈現的片段，反映實際類比訊號變化與數位訊號記錄之間的差異，可透過增加取樣頻率將之降低；當數位輸出編碼並未對應類比輸入電壓，導致轉換函數的起點偏移時，即會造成偏移誤差(offset error)；而當編碼達最大值且無偏移誤差存在時，若實際值與理想值有所差距，造成理想與實際之轉換函數斜率不同，則稱滿刻度誤差(full scale error)，誤差來源是因為參考電壓(reference voltage)出現精度誤差，可經由校準程序降低誤差。

此外，若訊號轉換的階高出現不一致的情況，與理想的最小位階電壓出現差異，造成輸出的數值不等於實際訊號，則稱為微分非線性誤差(Differential Nonlinearity, DNL)，並另有積分非線性誤差(Integral Nonlinearity, INL)用於描述實際的轉換含數與理想函數直線出現差異的情況。同時，還有一種誤差來自電壓的瞬間大幅改變，稱為突波(glitch)，可能的肇因包括接地面線路的電壓變動、訊號的不同步等因素(Wu *et. al*, 1995)，較難以避免。

一般資料記錄器於實際應用中，解析度多已受限於其內部積體電路之設計，解析類比訊號之振幅的能力已固定於特定位元；採樣頻率則受限於出廠設定，部分資料記錄器並未提供調整介面，或需以特定方式讀取，例如大部分數位輸出之沉水式壓力轉換儀已內建小型的資料轉換器，獨立進行 A/D 轉換以及簡易資料處理，國內較常使用的包括 In Situ 公司製造之 Troll 系列水位計以及 Schlumberger 的 Diver 系列水位計。而使用類比輸出之沉水式壓力轉換儀搭配資料記錄器者，則需對採樣頻率進行了解並依研究需求另行設定。此外，採樣頻率越高，除增加類比訊號之完現度，雜訊被呈現的機會亦隨之提高。

3.3 遠端監測與傳輸



地下水位監測系統建立後，資料的遠端傳輸可分為無線或有線訊號傳輸，考量因素包括研究地點之地理環境條件、依水位量測頻率決定的單位時間內資料量大小、資料回傳頻率與格式、區域網路頻寬等。預設於接收端之系統程式與硬體亦須具相對應之資料處理規格與穩定接收數據之能力。

含水層的地下水位之變化，由沉水式壓力轉換儀與資料記錄器整合進行量測並處理後，即可透過遠端傳輸介面傳輸至研究者指定點。一般而言，中長程距離之無線訊號傳輸，較為常見之選擇有三種，分別為全球移動通信系統(Global System for Mobile Communications, GSM)、整合封包無線服務(General Packet Radio Service, GPRS)、以及分碼多重進接(Code Division Multiple Access, CDMA)。

本研究針對建置之地下水位系統配置的無線訊號傳輸方式係採用 GPRS，為發展自 GSM 的資料傳輸方式，GSM 的數據傳輸方式為全程使用電路的「電路交換」(circuit switch)方式，GPRS 改以相同的電路進行傳輸，資料本身以封包交換(packet switch)方式取代，資料分成數個「封包」後傳輸，相對提高單位時間內傳輸量與網路流量之使用效率，故選定為本研究的遠端傳輸方式。其傳輸速率視資料編碼方式、系統可用資源、網路交通流量、以及使用場所狀況等因素而定。

現地操作沉水式壓力轉換儀與資料記錄器的所需電力各有不同，例如不同的採樣頻率會影響電力消耗；此外，儀器一般具有各自特定的輸出與輸入電壓需求範圍，兩者之間必須對應至相同範圍。部分儀器可直接仰賴直流電源，但部分則僅適用於交流電源，或者可與直流電源合併使用，故現地供電之配備與周邊電器材設備需符合系統需求，並須確保監測系統設置環境的供電穩定性，避免長期的地下水位監測記錄受電力供應狀況影響。



原始資料於接收並備份後，大氣校正、壓力換算、水頭標示轉換等後續部分，可依研究者指定分由資料記錄器預先處理，或於遠端監測端進行換算，兩者之選擇依研究者判斷，其基本原則為確保資料之正確性。此外，監測初期應另行量測地下水位，對照系統回傳資料，並於必要時予以校正，其後亦應定期另行檢視並量測現地地下水位，與水位記錄將對照並定期校正。

第四章 高頻遠端監測系統



本研究嘗試建置高頻遠端地下水位監測系統，將現今台灣主要以每小時量測一筆瞬時水位的記錄頻率改以每秒鐘一筆，並提升高頻地下水位監測系統量測的解析度及精度，以期能從更為微觀的角度瞭解地下水位的細微變化。

對於一個遠端監測系統而言，從評選儀器與其相關設備，到進入實驗室測試，直至開始監測、接收與處理資料的各個階段，均存在影響記錄品質的因素，因此在社寮地下水位觀測井建置高頻遠端監測系統的過程中，本研究嘗試於實驗室試驗階段透過可預期的試驗結果，識別影響監測結果的誤差來源，逐步進行排誤，提供實際應用監測之參考與改進的依據。

4.1 系統建置

依據規格評選出適當的儀器設備後，並非代表該監測系統能呈現符合預期的正確量測結果，原因之一為儀器設備的表現不一定與所示規格一致，排除電壓和相關設備的影響等因素，可能儀器本身即具有瑕疵，最直接的應對措施可直接汰換，然而地下水位監測系統的建置過程中，此為最容易處理之部分；原因之二則為最主要之因素，係與沉水式壓力轉換儀搭配的相關設備有關(管線設置、資料記錄器的處理模式等)，當沉水式壓力轉換儀經由電纜線與資料記錄器相接，影響資料品質與呈現結果的誤差來源亦同時增加，部分影響因素有時無法透過製造者所提供的介面進行改進，增加了改善資料品質的困難度。因此監測系統中各個組件選用的儀器設備必須經過全面性的審慎考量。

評擇應用於本研究監測系統中的組件時，沉水式壓力轉換儀以解析度及最高量測頻率為初步優先考量，其次為最大承載壓力、壓力量測模式等；與之相接之資料記錄器，優先評選與沉水式壓力轉換儀的電源輸入規格相符者，並將

資料儲存量、校時功能、電源需求模式、網路傳輸介面等也納入考量。連接兩者之間的電纜線與連接資料記錄器的電源線，則視研究需求考量其長度以及相關保護措施，其他較零星的細節諸如人為活動或現地氣候等影響程度較小的因素，一併納入建置時的綜合考量。

本研究嘗試進行遠端監測系統之現地量測試驗，選定南投縣的社寮地下水觀測井設置監測系統，資料量測頻率需求為一秒一筆，並考量該區域含水層的水位變化特性，在短時間內的水位變化較為細微，需要較高的解析度進行量測，綜合評估後評選後採用 Pressure Systems Inc.製造，型號為 KPSI 735 之沉水式壓力轉換儀。其外殼部分由不鏽鋼材質組成，具有防蝕功能，近量測點的末端由開放面鼻蓋(open face nose cap)保護，內部的壓力量測模式係採用差異壓力方式，屬於通氣式的感壓類型，而電源輸出模式使用 0.5 伏特(直流電)的電壓類比訊號。其物理特性與量測性能等項目如表 4.1 所示。

表 4.1 KPSI735 沉水式壓力轉換儀的物理特性與量測性能

重量	198g
電纜外殼材質	聚胺酯(Polyurethane)
最大承載壓力 (full scale)	30psig
耐壓壓力 (Proof Pressure)	1.5 x FS
破壞壓力 (Burst Pressure)	2.0 x FS
解析度 (Resolution)	±0.0001% FS
精度 (Accuracy)	±0.05% FSO

沉水式壓力轉換儀所能量測之最大承載壓力，於製作階段便已設定，一般通氣式可選擇的最大承載壓力範圍由小至大可分為 5、15、30、100、300、500 psi，而非通氣式則有 30、100、300、500 psi 等四種選擇。應用於本研究中的沉水式壓力轉換儀，其最大的承載壓力為 300 psig (約 210 m H₂O)，然考量到沉水式壓力轉換儀的最大承載壓力越高，其精度與解析度也相對越低，同時社寮地下水位觀測井歷年水位最大垂向變化範圍在 10 公尺以內，地表與地下水位面的距離之變動範圍亦約數公尺的狀況下，考量監測目的為取得高頻且高精度的水位變化記錄，在估算沉水式壓力轉換儀於現地可能遇到的最大承壓範圍後故指定應用於本研究中的最大承載壓力為 30 psig，換算單位約為 21 公尺，對應得理想解析度為 0.2 公釐，精準度約為 1 公分。

而此精準度值與解析度均僅限用於此最大承載壓力為 30psi 的沉水式壓力轉換儀，一旦承壓範圍超過此限，便會造成較大的量測誤差，當承壓為最大承載壓力的 1.5 倍時，尚可勉強維持量測的功能，若超過 2 倍以上，則會造成永久性破壞，而不論壓力超過多少，基準都來自沉水式壓力轉換儀內部的感壓膜片的承受壓力量，因此不僅過深的水位會造成量測上的過載，操作過程中的震動或碰撞也可能成為影響感壓膜片的外力因素，造成監測系統組件的耗損。

本系統使用的資料記錄器，由 SkyBees Technology 公司製造，型號為 GG200，內建 GPS 與 GPRS，內部設置 32 個頻道，可同時與 32 個衛星連線，資料的定時係經由感應衛星訊號後進行記錄，而後將量測資料以封包方式傳輸至遠端接收端。資料儲存項目包括時間、平均水壓以及電瓶電壓等項，部分功能則於遠端由另外撰寫的程式執行(例如由遠端設定取樣頻率或執行清除設定)。資料記錄器之物理特徵與相關資料列於表 4.2。

表 4.2 GG200 資料記錄器的物理特性與量測性能

外殼大小(公分)	12 x 9.3 x 3.4
重量	530 g
正常操作溫度	-20 ~ +60 °C
記憶體容量	1GB
A/D	0.5DCV
輸入口	4
取樣頻率	1.3600 秒/次
平均儲存與傳輸頻率	1.1440 分鐘/次
直流電壓輸入範圍	6.30VDC

選定沉水式壓力轉換儀與資料記錄器後，進一步與相關組件整合於防水外箱內，地下水位監測系統的雛型示於圖 4.1。本研究監測系統的訊號整合過程係經由資料記錄器將類比訊號數位化，進行儲存與傳輸後，再於遠端將類比電壓值經線性校正公式轉為水位記錄。然而雖然各個沉水式壓力轉換儀均以相同的製程製造，微幅的個體差異仍然存在，因此各自的校正公式皆不相同，下列公式僅適用應用於本研究的沉水式壓力轉換儀：

$$\text{Level} = 6.1807 \times (\text{VDC} - 0.1787)$$

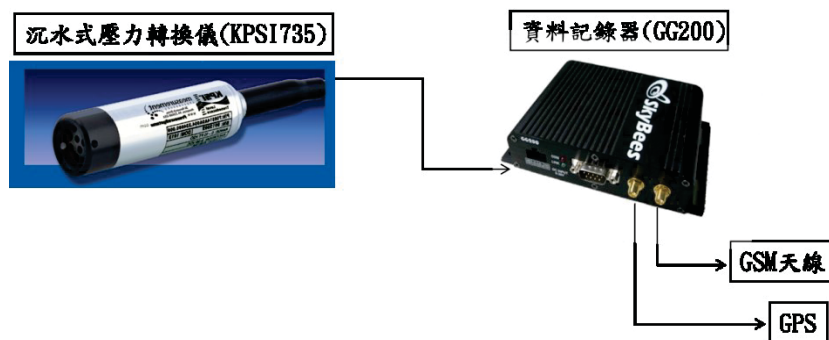


圖 4.1 本研究使用之沉水式壓力轉換儀與資料記錄器連接示意圖(修改自 Pressure Systems Inc.與 SkyBees Technology Co.)

4.2 系統設置與改進

沉水式壓力轉換儀於出廠前，多已進行一系列測試以確保其量測功能，例如多點測試、雜訊比(signal to noise ratio)、靈敏度(sensitivity)、零點與最大承載壓力(full scale) 以及穩定度等，各項測試總計歷時亦須達到一定的量測時數，然而將其應用於監測之前，依然有必要事前進行模擬量測，除了確保該轉換儀的量測結果符合預期，並且可以同時檢驗轉換儀與例如資料記錄器搭配時的綜合量測結果與記錄品質。

以本系統而言，測試時的主要方向為驗證該沉水式壓力轉換儀對於水位變化記錄的穩定性，並透過不同方式改變水體狀態，確認水位記錄是否反映實際水位變化。試驗方式包括靜置水體、震盪水體、或增減水位高度等方式，同時必須搭配不同量測頻率設定，以及配合資料記錄器以不同掃描速率進行量測，廣泛地進行驗證並觀察每次水位記錄的品質與結果，圖 4.2 即為給予間歇性震盪與靜置水體並進行水位量測的範例。此外，同時檢驗與調整遠端即時顯示系統，針對遠端傳輸的資料累積量、傳輸狀態等部分進行校驗，進行後端的處理程序。

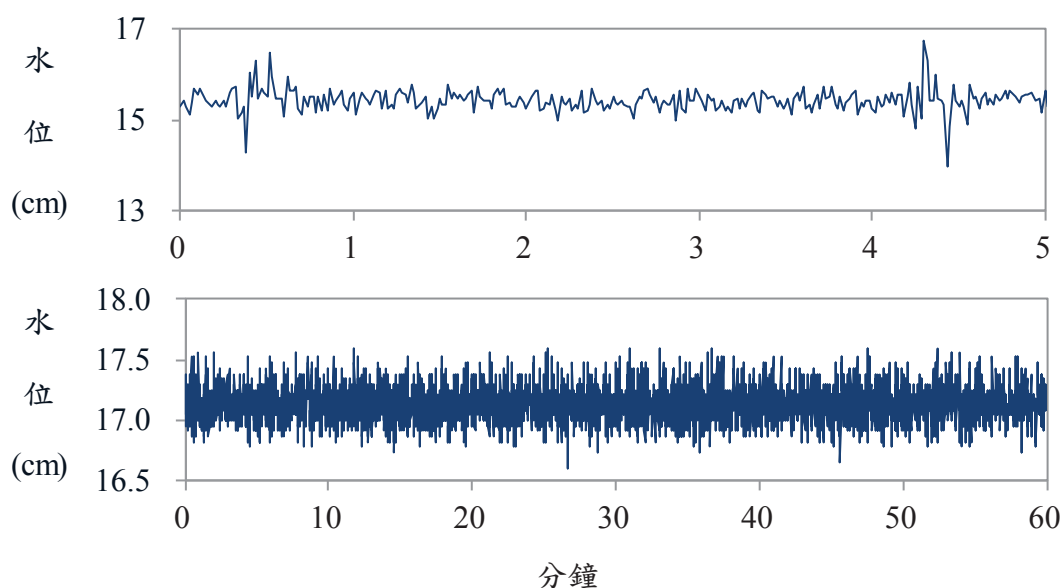


圖 4.2 給予水體間歇性震盪以及靜置水體的水位量測結果範例

4.2.1 穩定記錄所需時間

實驗室測試初期，除針對本研究使用之沉水式壓力轉換儀進行實際量測驗證穩定度與靈敏度，並在實驗室模擬井水位量測環境，使用設備為一台資料記錄器(GG200)與兩支沉水式壓力轉換儀(KPSI735)連接，期間分次進行數種不同量測頻率之瞬時水位變化測試，包括五分鐘一筆、一分鐘一筆、以及一秒鐘一筆等。圖 4.3 為將兩隻轉換儀置於同一深度，並每分鐘量測一筆的短期測試資料，測試內容為靜置水體而後微幅提高水位。

圖 4.3 顯示兩支沉水式壓力轉換儀的水位記錄大致相符，靜置期間水位波動的背景解析度均為 0.2 公釐左右，隨水位微幅增高，兩者之間的水位變化記錄僅有些微差異，直至試驗結束，水體再度靜置時，可觀察到兩者水位變化差異約為 0.21 公釐，對應水位變化的垂向變化記錄量亦相差無幾，顯示兩支沉水式壓力轉換儀的水位記錄具有良好的一致性，本研究認為此沉水式壓力轉換儀具有可對應未來社寮地下水位觀測井之量測能力與穩定性。

然而測試初期仍可發現水位記錄不相符的部分，圖 4.3 顯示自起始時間過兩個資料點，亦即兩分鐘後，兩支沉水式壓力轉換儀的水位記錄才趨於相符，在此之前一號沉水式壓力轉換儀所記錄水位約高出二號沉水式壓力轉換儀 0.15 公分，顯示沉水式壓力轉換儀自啟動到穩定的記錄水位需一定的時間，可能原因之一是轉換儀內部的感壓膜片對溫度相當敏感，沉水式壓力轉換儀在與水體的溫度及壓力變化達到平衡之前，會影響水位數據的記錄。



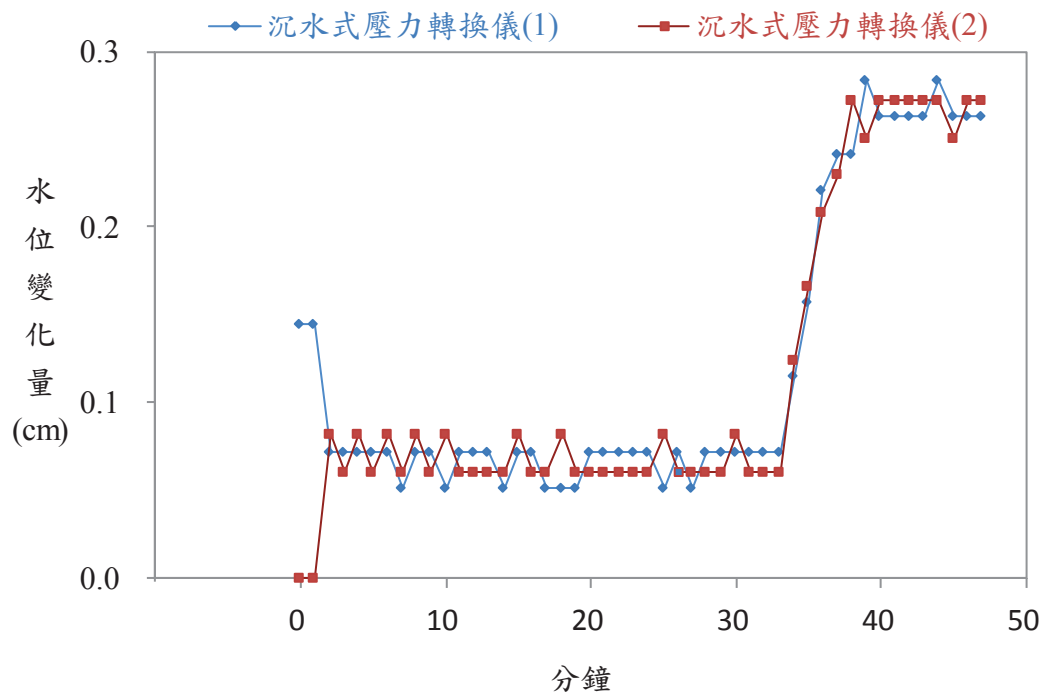


圖 4.3 沉水式壓力轉換儀實驗室試驗

台灣的觀測井地下水位記錄中，亦曾因洗井或其他因素導致監測記錄中斷，其後水位記錄於數小時甚至半天以上才回歸正常之狀況。因此地下水位資料正確性的影響因素，其一即為起始期間的量測誤差，對於分析較短時間水位變化之研究，有時須對監測起始期間的記錄進行評估，因其可能是儀器設備與外在環境達到平衡過程中引起之變化，並非真實地下水位。

4.2.2 驅動模式



後續實驗室測試期間，二號沉水式壓力轉換儀的水位記錄逐漸出現異常與錯誤，穩定度逐漸下降，以圖 4.4 所示為例，量測期間兩支沉水式壓力轉換儀置於靜置水體中，並間歇性的給予外力製造震盪，觀察水位變化，監測頻率為每秒一鐘一筆，總測試時間約 5 小時，圖中僅截取測試過程中部分片段，以突顯秒鐘級監測資料於解析度不足之情況下的量測結果，圖中可明顯觀察到二號沉水式壓力轉換儀的記錄明顯與一號沉水式壓力轉換儀不同。

一號沉水式壓力轉換儀可觀察到四次較主要的震盪變化，第一次震盪垂向最大變化量達 2.22 公釐，而二號沉水式壓力轉換儀則為 1.4 公釐，並未呈現如一號沉水式壓力轉換儀記錄到的向上較大幅度變化；而第二次震盪二者均有記錄到朝上的變化，然而二號沉水式壓力轉換儀並未反應朝下的震盪變化，並且呈現原因不明的水位持平，記錄的持平時間約數十秒；而第三次的震盪可以發現二號沉水式壓力轉換儀並未反映水位的上升變化，僅有水位變化朝下的記錄，並且之後並未立即回歸至原本水面高度，可以觀察到兩支所記錄到的垂向最大變化量與變化形態相當不同，當二號沉水式壓力轉換儀的記錄到達峰值的時候，出現約數十秒的水位持平，而且震盪後未回歸至原本水面高度。

測試結果顯示漸趨異常之二號沉水式壓力轉換儀無法應用於實地監測社寮地下水水位觀測井，藉由在實驗室試驗將之與一號沉水式壓力轉換儀對比，得以瞭解二號沉水式壓力轉換儀的水位記錄不屬於實際的水位變化，得以避免誤判。經由對比兩支沉水式壓力轉換儀的實驗室試驗結果，得以了解失去精準度的水位記錄反應之情況。

對於實際監測觀測井水位變化，沉水式壓力轉換儀的微小異常往往不易自時間尺度較大的水位記錄中發現，長達數月或數年的水位歷線圖可能無法顯現精確度逐漸降低的水位記錄情況，使研究者誤判為真實水位變化，甚至可能造成之後長時間累積之資料均需棄置之狀況。因此於地下水水位監測系統的建立前期，有必要率先濾除儀器原因造成之水位變化反應不精準的來源，並且了解其所造成的錯誤的水位變化型態為何，以供後續建立辨認的基準。

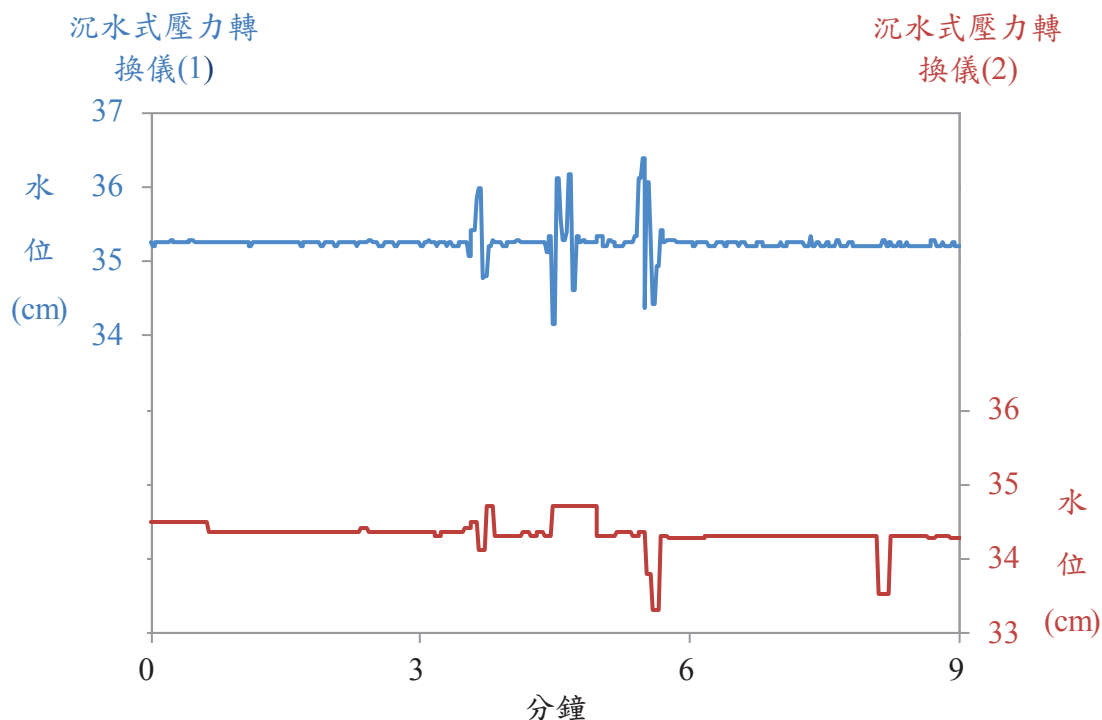


圖 4.4 對比置於同一水體並給予間歇性震盪的一號與二號沉水式壓力轉換儀水位記錄

此外，針對量測結果呈現解析度相對較低，且逐漸出現異常最終導致汰換的二號沉水式壓力轉換儀，研判可能與選用的驅動模式有關，本試驗中的兩支沉水式壓力轉換儀均採用定電壓源的模式進行量測，以 9-28v 的電壓輸入，並採用 0-5VDC 作為輸出的電壓格式資料(表 4.3)，主要差異來自二號沉水式壓力轉換儀的纜線較一號沉水式壓力轉換儀長，屬較長距之資料傳輸距離，然而使用定電壓源作為參考電源的沉水式壓力轉換儀，其輸出的電壓訊號準確性與線性相對較低，係因其具有因電阻隨導線變長而增大後，亦會隨之減弱導致量測訊號變小的特性，受溫度變化之影響亦相對較明顯，並可能因此造成二號沉水式壓力轉換儀的水位記錄產生異常。一般而言，定電壓源模式較適於 30 公尺以內纜線長的地下水位監測系統，因此過長的資料傳輸距離可能造成監測系統的負擔，導致量測資料的異常。

表 4.3 本研究之沉水式壓力轉換儀驅動模式的輸入與對應輸出規格

驅動方式 (excitation mode)		輸出規格
定電壓 (constant voltage)	9-28 V	0-5 VDC 0-2.5 VDC 0-4 VDC
	9-28 V	4-20 mA
	15-28 V	0-10 V
	10-28 V	1.5-7.5 VDC
定電流 (constant current)	20 mA(Max)	mA
	3-5 mA(Max)	VDC

4.2.3 資料處理速率

應用於本監測系統的沉水式壓力轉換儀與資料記錄器，其量測順序先由轉換儀感壓後將之轉換為以電壓值表示的類比訊號，而後建立時間上為多點連續之離散資料，之後傳輸至資料記錄器並依研究者指定速率進行處理，指定之取樣頻率將數位化的類比訊號轉為秒鐘、分鐘，或者小時級的數據，並統整與儲存。

於實驗室測試過程中，發現水位變化記錄之解析度的條件除了沉水式壓力轉換儀之外，尚有部分取決於資料記錄器的掃描頻率，不同的掃描頻率會導致水位記錄呈現的結果不同。以圖 4.5 與 4.6 為例，兩個試驗均使用同一支沉水式壓力轉換儀(KPSI735)測試，測驗過程中置於靜置水體，量測頻率均採一秒鐘一筆。圖 4.5 所示係指定資料以快速模式量測之結果，亦即設定較高的掃描速率處理來自轉換儀的數據，在同樣要求建立一秒鐘一個水位記錄點的情況下，因資料記錄器以相對較快的速率掃描資料，進而導致資料的呈現變得相對粗糙，此時背景水位的解析度約為 0.4 至 0.5 公釐，但水位變化記錄相對變得較為平穩。圖 4.6 為資料記錄器以一般模式執行之量測結果，在監測頻率同為一秒鐘一筆的情況下，一樣以全程靜置水體進行量測，可以觀察到量測得到的水位記錄與圖 4.5 截然不同，水位上下變動的幅度與密集程度大為提高，反應該次試驗水位記錄對水位變化的靈敏度提升，背景水位之解析度提高為 0.2 至 0.3 公釐左右，整體水位記錄反應細微的大氣壓力變化，產生小幅的趨勢變化。

針對本研究所使用的資料記錄器以兩種不同掃描頻率的模式執行量測的結果，可發現快速模式能提供較平穩但解析度相對較低的水位變化記錄，採用一般模式則會提高記錄解析度，反應更細微水位變化。然而，與此同時雜訊被放大之可能性亦相對提高。

於地下水井進行地下水位監測時，除了考量資料記錄器的性能設定，掃描頻率的採用亦須考慮研究目的與研究區域的含水層特性，以本研究的社寮地下水位觀測井為例，該井長時間水位變化趨勢平緩，背景水位變動幅度小，考量高頻監測之目的旨在分析時間尺度較短的相對顯著變化，故選用快速執行模式應用於監測系統中。

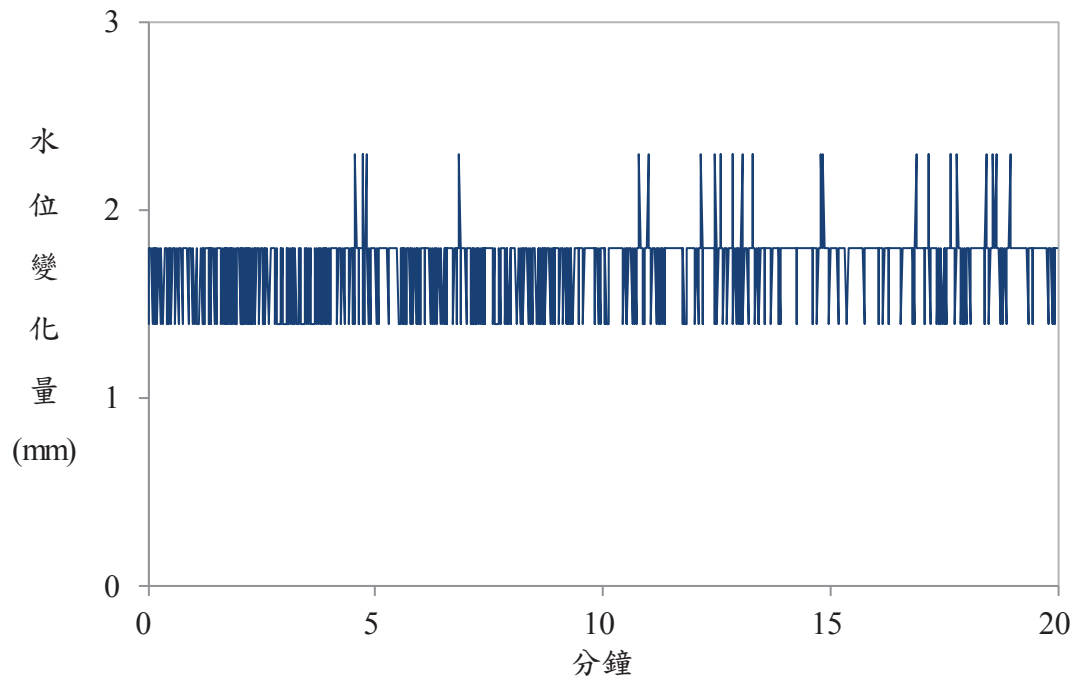


圖 4.5 資料記錄器以快速模式執行，一秒鐘一筆之水位變化量

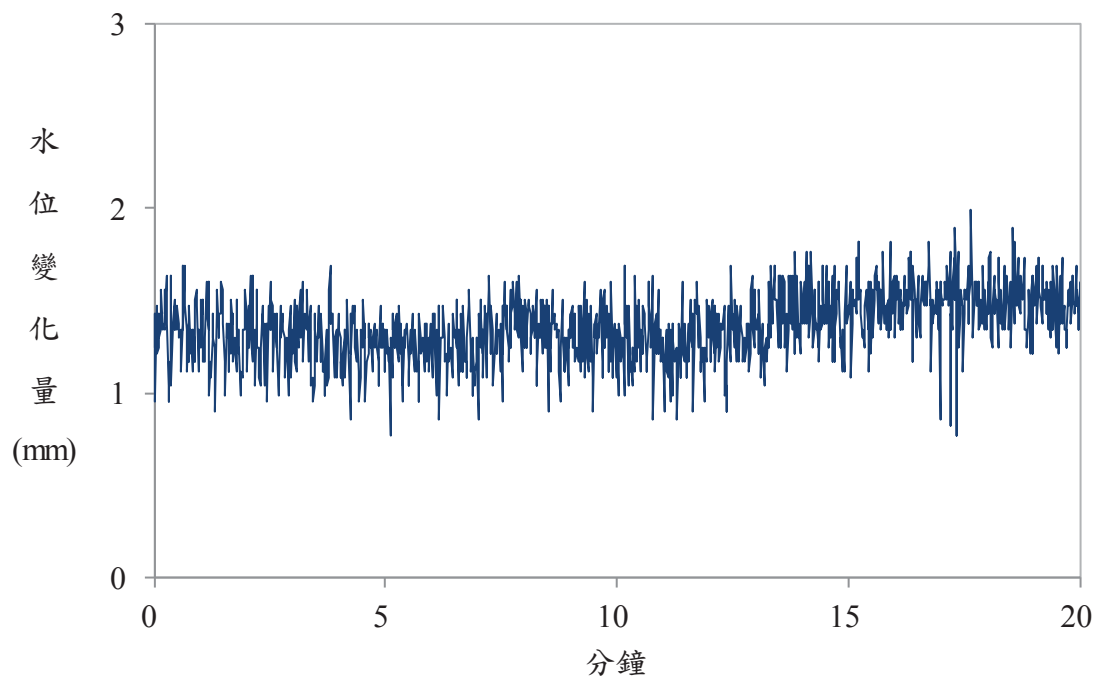


圖 4.6 資料記錄器以一般模式執行，一秒鐘一筆之水位變化量

4.2.4 供電穩定性

供電電壓之穩定性對於高解析度的高頻遠端監測系統相當重要，對於以電阻元件為核心的沉水式壓力轉換儀，其內部的感壓元件必須先透過供電電壓輸入啟動，而後才能感應壓力變化，因此對供電電壓的變化極為敏感。不穩定的供電電壓或臨時性的斷電，會影響量測結果，造成沉水式壓力轉換儀除了感應實際水壓變化造成的電壓訊號外，額外受到供電電壓變化的影響，可能造成不屬於實際水位變化的脈衝訊號，並且可能因臨時性斷電造成資料中斷以及相關儀器設備的損壞，必須針對此可能性加以防範。

本研究經考量後選擇於現地與遠端監測點設置具有穩壓功能的不斷電系統(uninterruptible power supply, UPS)，選擇的型號為 BE500TW，由 American Power Conversion 公司製造，突波能量的吸收量為 365 焦耳，額定容量(每秒最大電功率)為 300 瓦(500 伏安培)，最大總電能供應量為 90000 焦耳，亦即能以最大負載 300 瓦連續供電約 5 分鐘(圖 4.7)，用以排除觀測井供電電壓不穩對水位記錄穩定性之影響。

本研究設置的地下水位監測系統中，沉水式壓力轉換儀與資料記錄器相連，所需的供電由資料記錄器連接供應，以資料記錄器(GG200)之電源輸入規格 100 毫安培與 12 伏特(直流電)計算，亦即其所需電功率為 1.2 瓦，換算後該系統可於斷電時連續供電約 20 小時，作為供電中斷時期的臨時電源。於實驗室實際對使用於本研究的監測系統進行測試後，確定可提供未來社寮現地供電中斷後連續 8 小時以上的供電需求量。

於實驗室試驗階段，曾因遠端監測端斷電造成資料庫損毀，導致資料的傳輸與接收中斷，故對於預設長期使用外接電源之遠端監測系統，有必要考量供電本身與供電電壓之穩定性，設置相關的應對設備，並能因而避免地下水位記錄因意外(地震或暴雨等)因素造成記錄缺漏或異常。

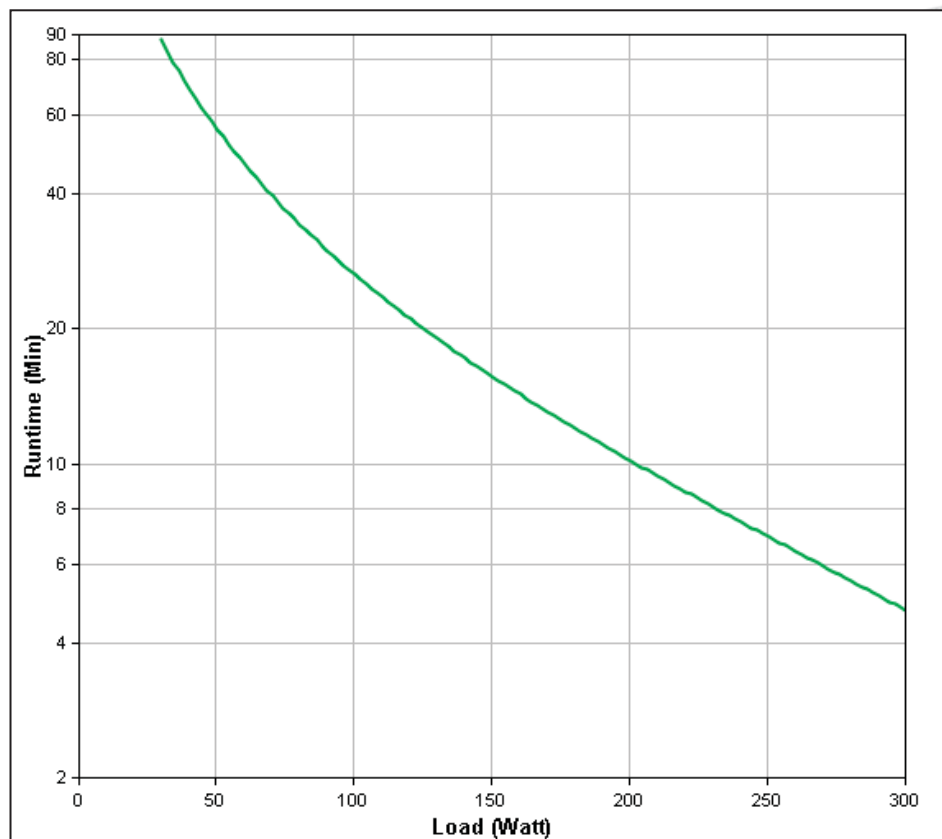


圖 4.7 本研究所使用的 UPS 備電能力圖(修改自 APC)

4.3 現地監測

本研究中地下水位監測系統經過總計 655 小時的試驗與校正後，除了建立對於可能影響地下水位記錄品質之因素的了解，並考量該系統後續的實際應用，選用通氣式的沉水式壓力轉換儀進行設置以排除氣壓變化影響，最大承載壓力選定 30 psi，以對應預定監測地點之地下水位變化，參考電源之驅動模式採定電壓源，並另設置不斷電穩壓系統保持供電電壓的穩定性，資料的處理則採用快速模式以利觀察到細微的水位變化。同時為確保高頻資料於時間記錄上的正確性，採用全球定位系統進行校時，資料的遠端傳輸方式使用 GPRS 傳輸，每分鐘傳輸一次封包，遠端即時接收端則以每一分鐘更新一次在螢幕顯示最新地下水位變化，即時觀察的時間區間範圍為一至三小時。

監測系統的設置規劃除考量電源的供應外，並另行分析社寮地下水位觀測井的時水位歷史記錄，預先了解社寮的地下水位變化模式，確保排除人為活動之影響，選定之觀測井位於南投縣竹山鎮社寮國小。

沉水式壓力轉換儀置於井深 20 公尺處，置於地表之傳輸線以聚氯乙烯(PVC)材質的套管保護，地下水位監測系統中設於地表的組件(資料記錄器、不斷電穩壓系統、除濕設備等)(圖 4.8)，整合置入防水箱後架設於觀測井周邊區域。



圖 4.8 社寮地下水位觀測井現地高頻遠端地下水位監測系統

第五章 社寮地下水位觀測井高頻水位變化



5.1 社寮地下水位觀測井及時水位記錄分析

社寮地下水位觀測井之建置始於經濟部水利署發起之為期 17 年的台灣地區地下水觀測網計畫，此計畫將台灣的地下水分布進行分界，並對各區的水文地質進行多個探勘項目，包括地質鑽探與岩芯分析、地球物理測勘、地表電阻率探勘、古沉積環境地層研究、地下水觀測井的建置與管理、以及水利試驗與水質分析等，並將台灣區域地下水依流域及行政區域進行分界後，建立各區的水文地質分層及地下水概念模型，建置全台灣全面性的水文地質資料庫。其中的社寮地下水位觀測井屬於台灣地區地下水觀測網計畫 1992 年至 1998 年第一期計畫的建置井，井號 08040311，緯度為東經 $120^{\circ}42'$ ，北緯 $23^{\circ}48'$ ，設址於南投縣竹山鎮社寮里集山路 1723 號社寮國小內。該期計畫期間總計為期 7 年，調查範圍包括濁水溪沖積扇、屏東平原、以及朴子溪以北的嘉南平原(江崇榮等，1999)。

第一期計畫包括總面積約 1800 平方公里的濁水溪沖積扇，對其細部水文地質進行探勘，濁水溪河水主要發源於合歡山主峰與東峰之間的佐久間鞍部，流經之行政區域包括彰化縣、雲林縣、嘉義縣、以及南投縣，並自彰化縣大城鄉下海墘村及雲林縣麥寮鄉許厝寮之間流入台灣海峽，主流長度總計約 186.6 公里，為全國最大的沖積扇與三角洲平原，計畫期間此區域總計設置了 77 站水文地質調查站以及 175 口地下水觀測井，設置範圍自東向西涵蓋中央山脈以西、丘陵、台地、以及下游之沖積扇平原，包含八卦山脈與斗六丘陵，北以烏溪為界，南至朴子溪，全區水文地質的調查深度平原區域達 300 公尺左右，山區的調查深度達 250 公尺左右。本研究對象社寮地下水位觀測井即位於濁水溪沖積扇扇頂上方之區域(圖 5.1)。

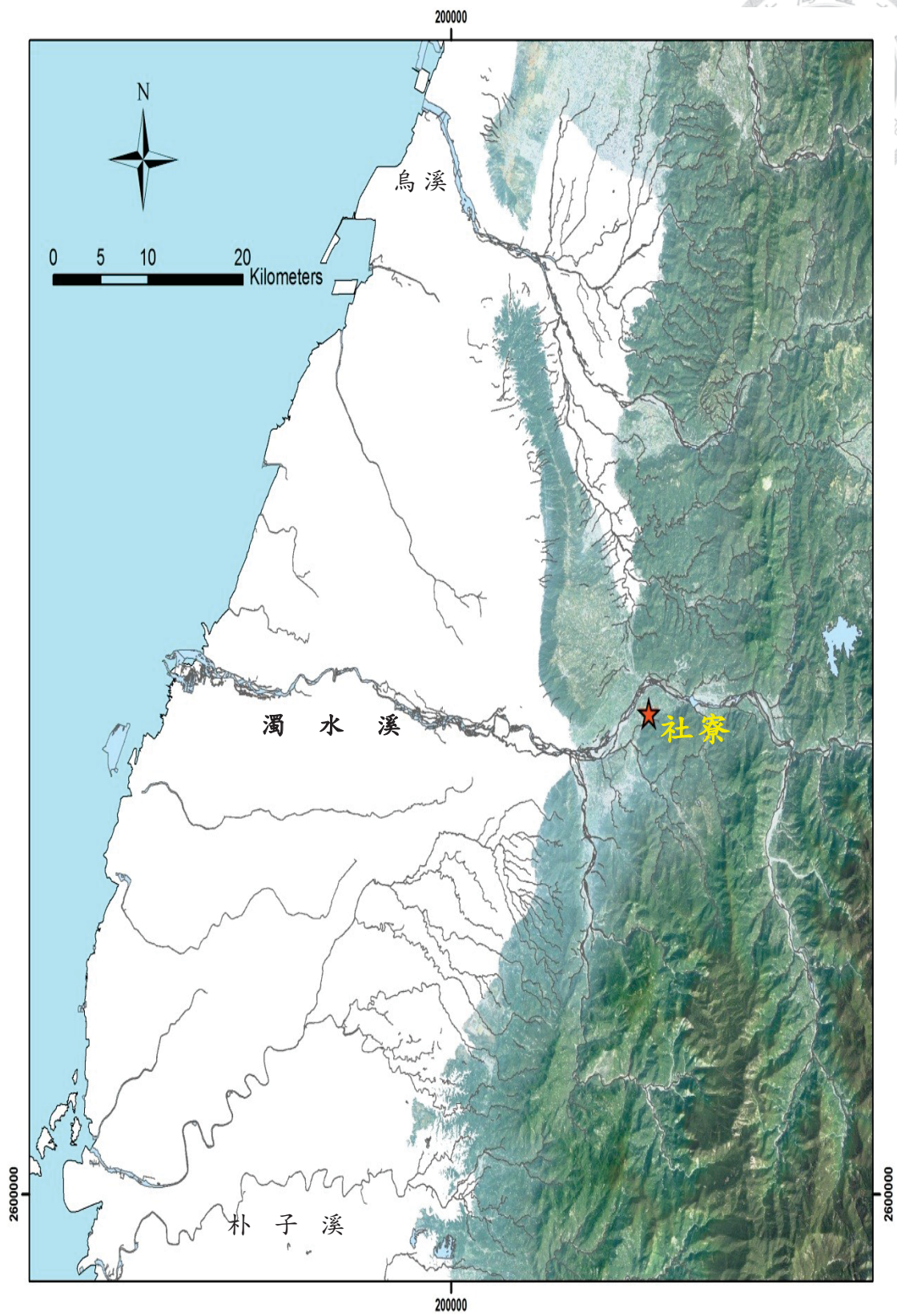
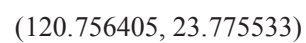


圖 5.1 社寮地下水位觀測井之地理位置

社寮地下水位觀測井地處台灣中央山脈西部麓山帶與濁水溪沖積扇頂交界處上緣，位於濁水溪左岸約 1.5 公里處，往西北方鄰近八卦山脈，往西南方與斗六丘陵相接，屬於濁水溪中游集水區外麓山帶之範圍。該區岩盤為更新世之頭嵙山礫石層與上新世之錦水頁岩層，頭嵙山層沉積範圍位於中央山脈西側，沉積來源包括山麓堆積沖積扇、快速河道沉積、以及外側的淺海沉積，構成之地質材料包含由石英岩質砂岩與板岩組成之礫石以及板岩屑砂岩；錦水頁岩則生成於淺海以下的海相沉積環境，偶夾砂岩、粉砂岩與泥岩的透鏡體，可觀察到腹足類、斧足類、有孔蟲等古生物化石(2008，陳培源)。

整體而言，社寮地下水位觀測井所在區域之地質材料由晚更新世至上新世之礫石、砂、與黏土組成，岩盤地層則由頭嵙山層與錦水頁岩層組成，大致屬於低度膠結度之礫岩、砂岩、與泥岩(圖 5.2)。此區受快速沉積作用，且未受明顯的全球海進海退事件影響，進而得以堆積出大範圍河相的巨厚礫石層，使其出露於地表之區域成為高連通性之地下水補注區，而其西側與車籠埔斷層相鄰，根據中央地質調查所針對其水位分布之研究，斷層對此處含水層而言可視為一個不透水邊界。

(120.756405, 23.846737)



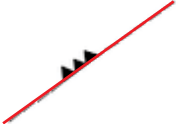
- | | | | |
|---|-----------------|---|-------------|
|  | 第四紀
沖積層 |  | 斷層 |
|  | 全新世
階地堆積層 |  | 掩覆或推測斷層 |
|  | 全新世
階地與山麓沖積層 |  | 活斷層(虛線表示推測) |
|  | 更新世
紅土台地堆積層 |  | 逆斷層(鋸齒示上升側) |
|  | 更新世
頭嵙山層香山段 | | |
|  | 更新世
八卦山層 | | |
|  | 上新世
卓蘭層 | | |

圖 5.2 社寮地下水觀測井所在區域地質圖(修改自中央地質調查所)

社寮地下水位觀測井建於 1996 年 7 月 26 日，該井之地表高程為 179 公尺，井深 24 公尺，岩性顯示於圖 5.3，該地之地層自地表往下深度約一公尺內由粉砂與黏土組成，其下約 16 公尺皆為河道礫石層，亦為此區含水層之主要分布範圍，根據歷年時水位資料也可觀察到社寮地下水位觀測井地下水位的季節性變化幅度亦介於此深度範圍內，而井管開篩深度則位在地表下 9 至 18 公尺處。

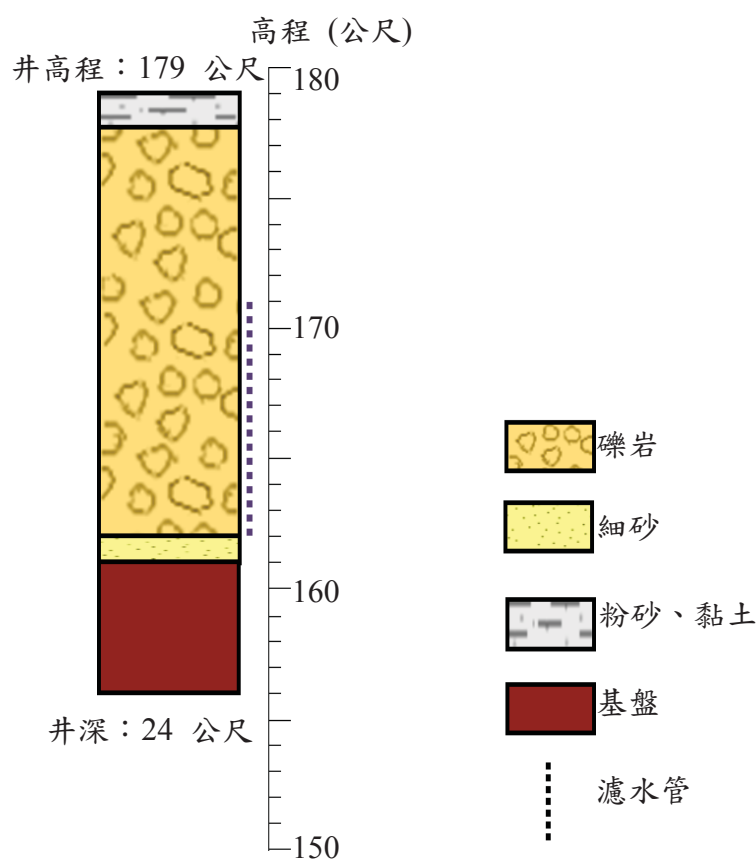


圖 5.3 社寮地下水位觀測井岩心柱

社寮地下水位觀測井之時水位記錄始自 1997 年 1 月 1 日，水位記錄之解析度為 1 公分，而本研究使用之高頻高解析度的地下水位監測系統設置於 2011 年 6 月 24 日，監測頻率採 1 秒 1 筆，解析度為 0.2 公釐。

位於濁水溪沖積扇扇頂山坡上緣之社寮地下水位觀測井，根據鑽探資料顯示，地層主要由礫石組成，使社寮觀測井所屬的含水層具有高度透水的特徵。根據社寮觀測井 1997 年至 2012 年的地下水位記錄，分析其地下水位變化與大氣壓力變化之間的相關性，並無明顯的證據顯示社寮地下水位變化受到大氣壓力影響，一般而言，自由含水層於大氣壓力改變的過程中，其上方的未飽和帶可藉由氣體在孔隙以及井壁間的出入，平衡大氣壓力的改變，進而抵銷大氣壓力對自由水面的作用力，使自由含水層較不受大氣壓力影響，因此自由水面不會呈現隨大氣壓力變化變動之現象，而社寮觀測井即呈現此項反應結果，此外，將社寮的地下水位記錄切割成較短之時間尺度進行分析，亦未觀察到明顯的地下水位隨固體潮變化的現象，以上現象都指出社寮的含水層主要呈現自由含水層之特性。

分析歷年社寮地下水位觀測井之地下水位的時水位記錄，可觀察到其地下水位季節性變化範圍約略介於地表下深度 6 至 18 公尺處；對地震之同震反應較常見為變化幅度相對較小之持續式變化，持續式變化量為 3 公分以下，僅 1999 年集集地震造成 14 公分的震盪式變化；對降雨反應在雨季較為明顯，若以較為宏觀角度檢視社寮地下水位觀測井之年度地下水位變化，僅可自該年地下水位高峰期判別乾、濕兩季受降雨影響之差異，然排除大量降雨的雨季之後，其他時期之地下水位變化與降雨之間尚無顯著之關聯性。將社寮地下水位觀測井的水位變化與直線距離最近的雨量站進行對比，包括集集站、日月潭站、竹山站，發現以竹山站與社寮地下水位觀測井的水位變化關係最為密切，遂採用竹山站雨量記錄進行分析。以 2010 年的社寮地下水位歷線圖為例(圖 5.4)，社寮地下水位與竹山站雨量對比之結果顯示，社寮地下水位觀測井地下水位受雨季降雨補注地下水，引發顯著的地下水位上升變化，達到該年地下水位之最高峰值，雨季時期之外，降雨事件與水位變化兩者之間的關聯性則較不明顯，反應以小時頻率記錄的社寮地下水位，對降雨反應較不靈敏，分月檢視後亦可發現平時地下水位變化呈現較為穩定且平緩的趨勢。

為進一步釐清社寮地下水位觀測井在時水位記錄的情況下，對降雨反映是否有受鄰近含水層或地表水影響，遂將社寮地下水位觀測井的水位變化記錄與最近之地表水文站(彰雲橋站)的地表水位記錄進行對比。圖 5.4 中即一併對比 2010 年社寮地下水位觀測井與地表水彰雲橋站的地表水位全年變化，可觀察到兩者對較大規模之降雨事件，均反應相當接近的變化趨勢，在反應時間上也呈現一致性，顯示社寮地下水位變化趨勢與鄰近之濁水溪水位之變化具有一定程度的正相關。

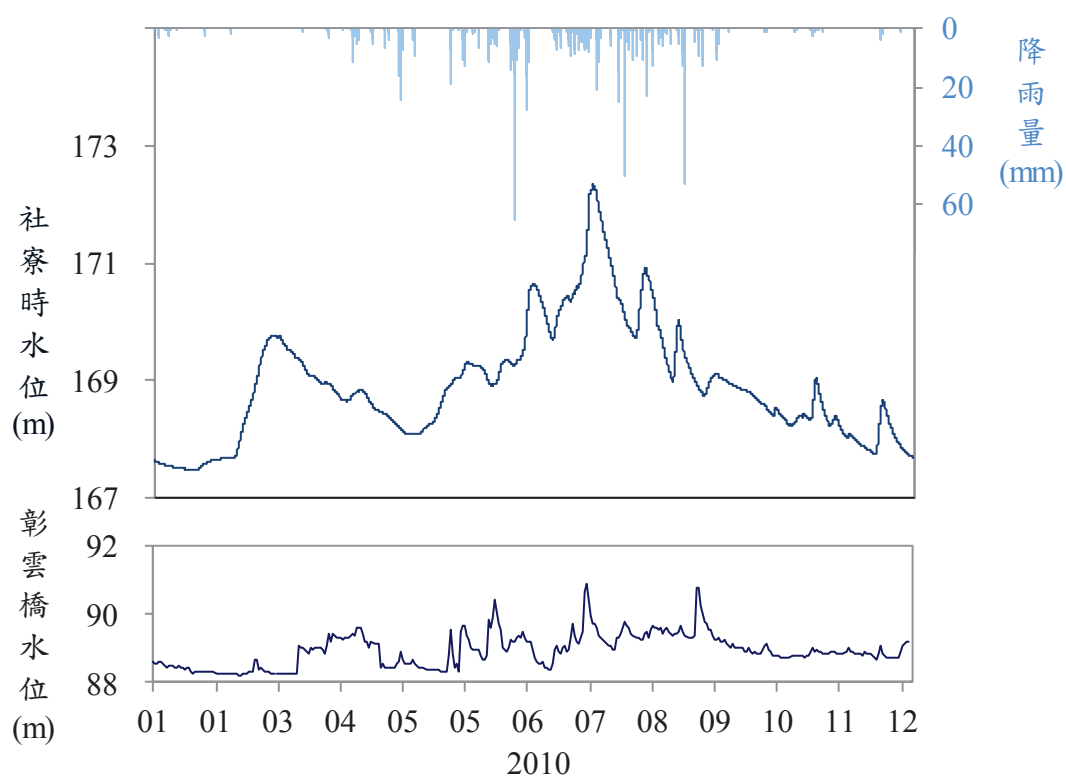


圖 5.4 2010 年社寮地下水位與彰雲橋站水位歷線圖

當進一步分月進行檢視社寮地下水位觀測井與彰雲橋水位的水位變化，可發現大部分的降雨事件都會引發社寮井與彰雲橋的水位發生變化，以圖 5.5 為例，地表水對於降雨的反應較為靈敏，並於降雨量達最大值後迅速回落，社寮地下水位觀測井對降雨的反應則較為緩慢，有延遲上升的現象，然而水位上升變化的持續時間較長，兩者對降雨反應相異的情況顯示濁水溪的水位變動對於社寮含水層水位變化的影響並不顯著，但仍可從水位於降雨過後仍持續上升之情形，觀察到自由含水層陸續受到雨水入滲與周圍含水層的補注影響。然而社寮地下水位觀測井所在之周邊山坡農地，存在數條大小不等的水圳與溪流，例如其北方相距約 300 公尺的獅尾堀仔圳以及南邊的溫水坑溪，可作為當地農業灌溉的水源，隨著水圳與溪流在枯水期、豐水期之不同變化，以及來自集集攔河堰人為調節的放流量，可能影響社寮觀測井地下水位的背景變化趨勢。

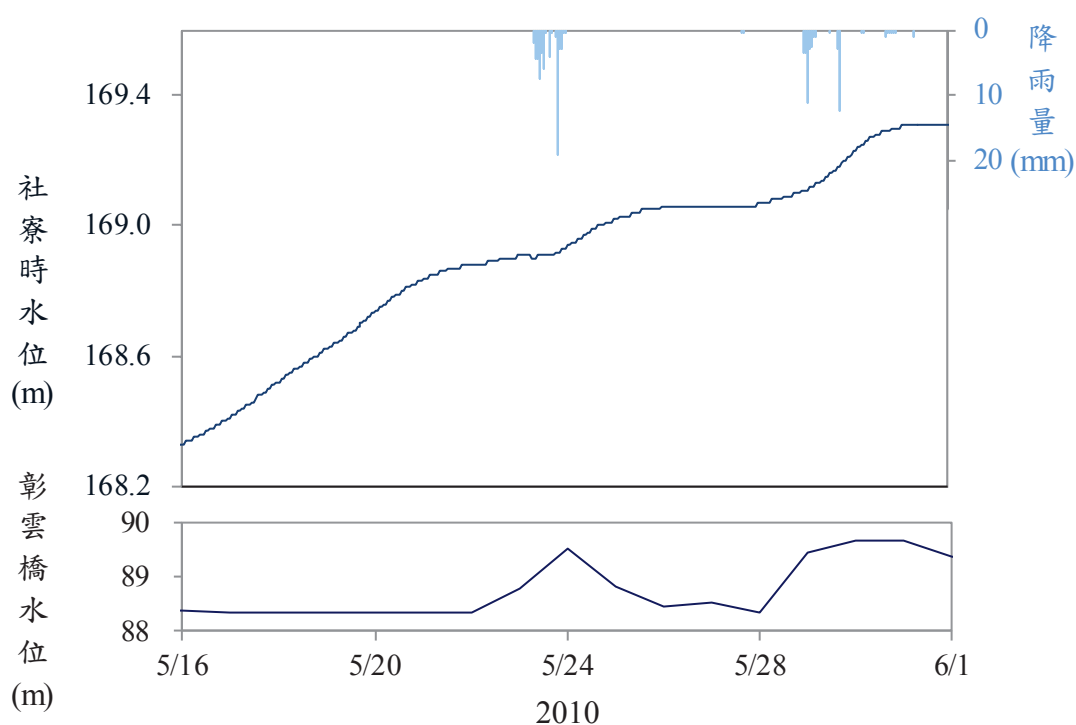


圖 5.5 2010 年 5 月下旬社寮地下水位與彰雲橋站地表水的對降雨反應

5.2 降雨引發含水層承受之荷重改變現象

檢視歷年社寮地下水位觀測井的時水位記錄，可發現其對降雨之反應以雨季時期較為明顯，受到颱風影響，地下水位多於此時期達到該年最高峰，進一步分析後，可發現雨季期間的地下水位變化型態以連續穩定上升為主，水位上升的時間與降雨發生時間相較有延宕之情況，反映社寮含水層對降雨之反應，主要來自該區域內的降雨補注含水層，造成地下水位上升，另有少部分來自側向含水層的補注，使地下水位在達到高點後，便逐漸與鄰近含水層達到平衡並下降；然而分析高頻的秒水位記錄，可發現在降雨開始後，在降雨無充分時間入滲地表並滲透到含水層的情況下，地下水位於降雨開始後的短時間內便產生即時的細微變化，顯示在降雨發生後，含水層本身還未受到降雨入滲補注，地表的降雨與停留在未飽和帶中的雨水改變地層帶給含水層的荷重，並進而影響到地下水位。

以 2011 年 11 月的降雨事件為例(圖 5.6)，降雨時間為 2011 年 11 月 7 日 16 時至 10 日 23 時結束，降雨歷時超過 3 天，累計降雨量達 184.5 公釐，單位小時降雨量最高達 19 公釐，社寮的地下水位在降雨開始約 3 天後，於小時降雨量接近最大值時，出現較劇烈之上升，顯示此時含水層地下水位受降雨補注進而上升，降雨結束後水位持續上升超過 2 天，其後轉為逐漸下降，反映社寮對降雨量達一定程度之降雨事件的基本反映型態。

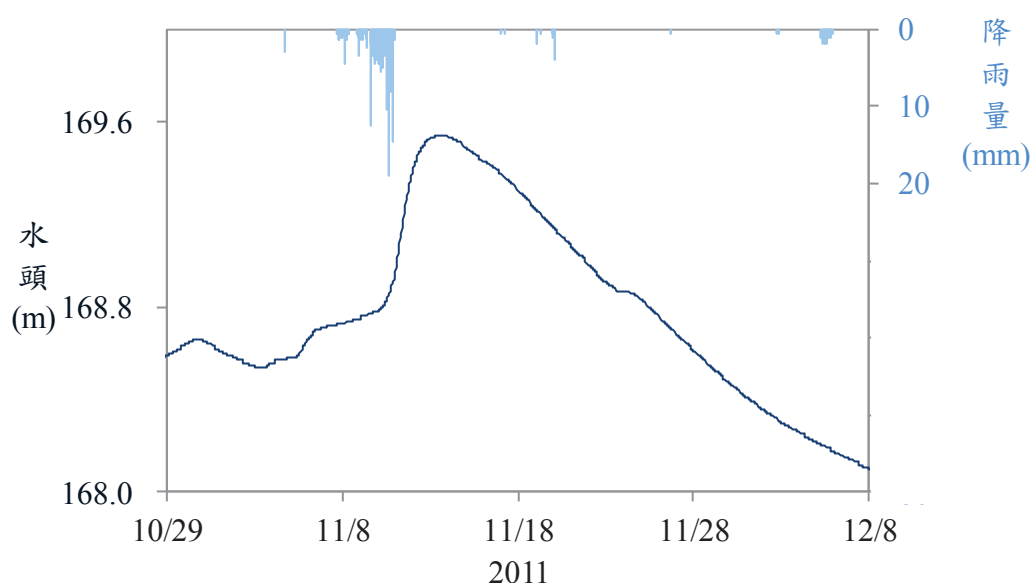


圖 5.6 2011 年 11 月社寮井時水位記錄對降雨之反應

從時水位記錄可瞭解社寮含水層對降雨量達一定程度之降雨事件的主要反應形態，釐清社寮的地下水位對降雨的反應延宕情形、上升變化幅度、以及持續性等特性，繼而得以從高頻的秒水位記錄中，以更微觀的尺度分析社寮地下水位對降雨的反應。自 2011 年 6 月 24 日於社寮地下水位觀測井增設高頻高解析度之地下水位監測系統後，在以 1Hz 的頻率、0.2 公釐的解析度記錄地下水位變化的情況下，分析秒水位資料後，可觀察到社寮的含水層對降雨量較少之降雨亦有出現些微的地下水位變化，此外，還觀察到上升型態以外的地下水位變化型態，以下以 2012 年 4 月 6 日及 2012 年 4 月 18 日兩次降雨事件造成的變化為例。

2012 年 4 月 18 日之降雨事件(圖 5.7)，該次降雨歷時為 5 小時，總累積降雨量為 69.5 公釐，單位小時最大降雨量達 42.5 公釐，為降雨強度較大之降雨事件，地下水位於降雨後 3 小時由原本的下降趨勢轉為上升，並出現多次類似震盪的上下變動，變化幅度最大為 3.4 公釐，水位約持續變動 2 小時，之後轉為平穩並回歸原本區域地下水位的變化趨勢，此變化反應地下水位於該次降雨強度較大的降雨事件中，地下水位因地表荷重改變產生細微的動態變化。

2012 年 4 月 6 日之降雨事件(圖 5.8)，降雨歷時為 9 小時，總累積降雨量達 35.5 公釐，單位小時最大降雨量為 14 公釐，地下水位於單位小時降雨量達最大值後開始逐漸上升，水位變化約持續 17 小時，上升約 11.7 公釐，這種水位變化的幾何型態與時水位記錄常見之大量降雨後的水位變化型態類似，皆於降雨後呈現上升變化，然而秒鐘水位與時水位反應之時間尺度不同，時水位記錄對降雨產生反應的延宕時間普遍較長，受降雨影響產生變化普遍需時約半天至數日不等，顯示降雨於延宕期間入滲至地下水面，補注地下水使其上升；而秒鐘記錄提高了對降雨反應的靈敏性，並記錄到不同機制之水位變化，地下水位明顯在開始降雨後數小時內即轉趨上升，此時時間尚不足夠使降雨入滲至地下水面，含水層尚未受到補注，秒鐘水位記錄所觀察到的水位上升反應，反應降雨期間地表荷重隨降雨增加，導致含水層受壓進而引發地下水位上升。

從社寮地下水位觀測井的秒鐘水位記錄，可觀察到降雨對地下水位的細微影響，地下水位於開始降雨後短時間內出現即時性的變化，水位變化型態包括上升式變化或者上下變動，反應地下水位變化主要受到降雨影響地表荷重，進而使含水層受壓情況出現變化所致。

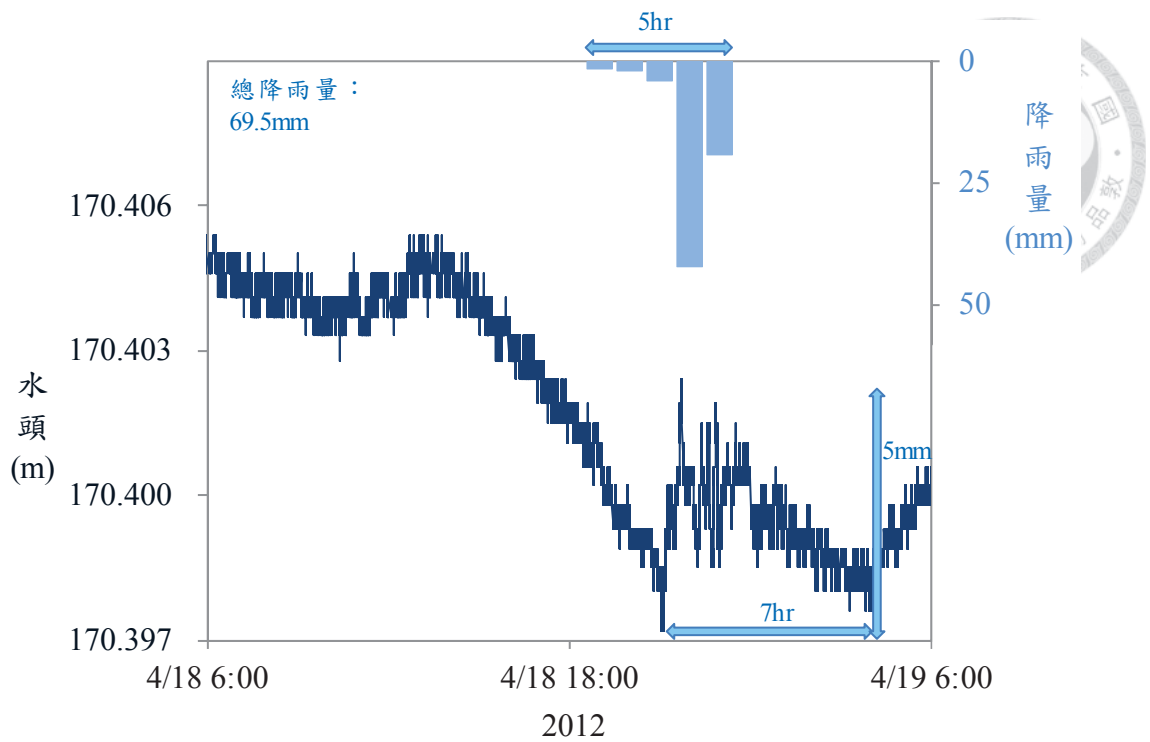


圖 5.7 2012 年 4 月 18 日秒水位記錄對降雨之反應

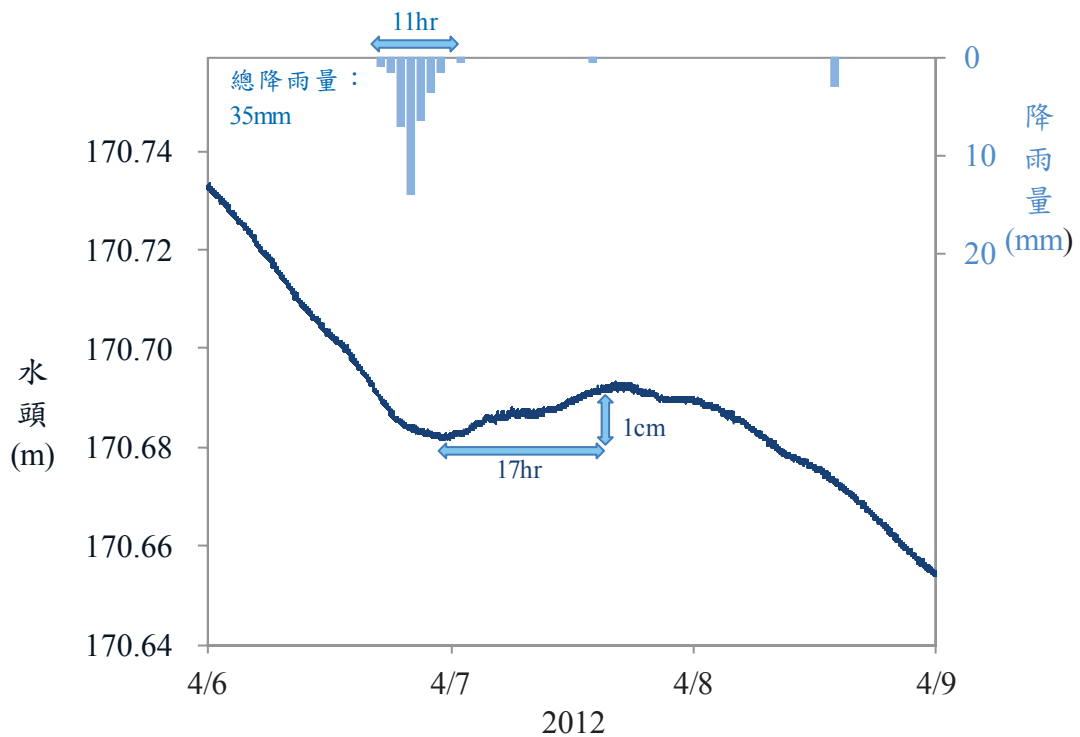


圖 5.8 2012 年 4 月 6 日秒水位記錄對降雨之反應

檢視社寮的高頻地下水位監測記錄後，發現部分地下水位變化並未反應降雨事件，於降雨期間與前後均未改變其水位變化趨勢，顯示社寮地下水位是否受降雨影響產生變化受限於某些特定降雨條件。遂針對 2011 年 11 月至 2012 年 5 月旱季期間的降雨事件進行統計，將累積降雨量、平均小時降雨量、降雨歷時、小時最大降雨量等降雨參數與水位變化量、水位變化歷時等進行對比，所得之初步分析結果關聯性並不明顯，無顯著線性關係，進一步探究其原因後，發現降雨歷時過短或累積降雨量過小，皆無法對社寮的地下水位產生顯著影響，進而導致統計結果無法順利呈現降雨與社寮地下水位變化之關係，故將降雨歷時 1 小時以下、累積降雨量 3 公釐以下之降雨事件省略不計，遂發現降雨參數中，對於社寮地下水位是否對降雨產生影響，以累積降雨量為較重要之決定性因素，平均小時降雨量的影響程度略低，此外，地下水位的變化量與降雨量亦無明顯的線性關係。

將降雨事件依社寮地下水位是否產生變化，分類為有反應之降雨事件以及無反應之降雨事件後，將有反應事件數與無反應事件數與總降雨事件數對比，並與降雨量，後百分比呈現(圖 5.9)，發現無反應降雨事件僅限於降雨量 30 公釐以下之降雨情形，並有隨降雨量增大而遞減之情形，而降雨量達 40 公釐以上後，社寮地下水位即出現與降雨相對應之水位變化。

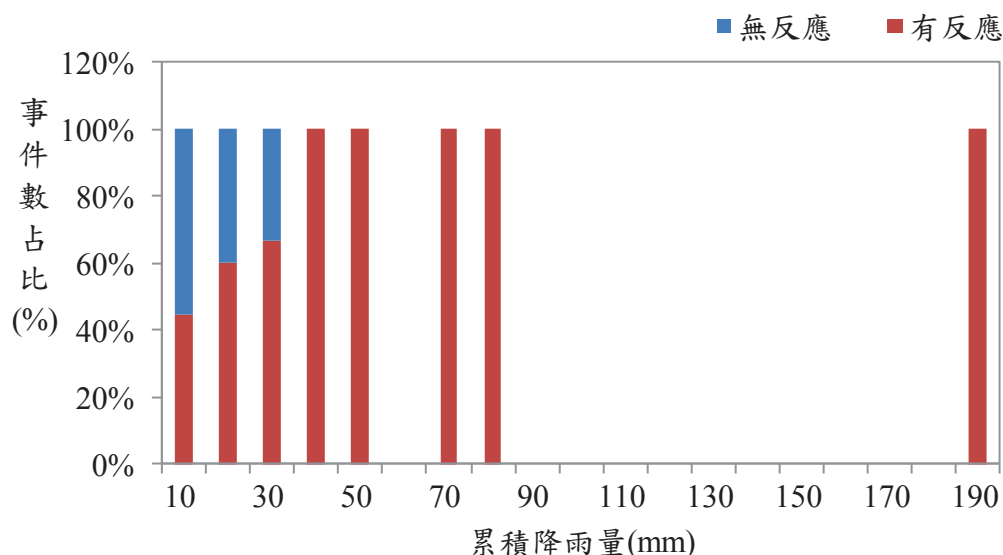


圖 5.9 有反應降雨事件與無反應降雨事件對累積降雨事件之佔比分布

5.3 社寮高頻觀測井對地震之反應



為進一步瞭解社寮地下水位觀測井對於地震之反應，除分析社寮地下水位觀測井的高頻水位記錄對地震之反應，亦同時將之與時水位記錄進行對比，分析 1997 年至 2012 年社寮地下水位觀測井時水位記錄後，發現社寮地下水位觀測井的同震反應以持續式變化為主，其中又以上升式變化佔大多數。以 2008 年 4 月 25 日 14 時 45 分芮氏規模 4.5 的地震為例(圖 5.10)，震央位於台東近海，原本呈現下降趨勢之地下水位於地震發生時轉為上升，地下水位持續上升兩小時，水位變化 2 公分，震後兩小時地下水位即恢復原本的水位下降變化趨勢，此持續式變化為社寮地下水位觀測井以小時記錄，較常見之同震反應型態；另一同震反應型態以 1999 年 9 月 21 日 13 時 47 分芮氏規模為 7.3 之集集地震為例(圖 5.11)，地下水位於地震發生當小時上升 14 公分，並於震後 1 小時恢復原本水位變化趨勢，為震盪式的同震反應型態。綜觀 1997 年至 2012 年社寮地下水位觀測井時水位記錄，社寮地下水位觀測井對地震反應的靈敏度並不高，持續式同震反應的水位變化量相對較小，地下水位變化量均於 2 公分以下，其中僅以 1999 年 9 月 21 日集集地震造成的變化量最大，且為震盪式反應，此外，社寮地下水位觀測井發生同震變化後，地下水位均於震後 2 至 4 小時內回復原本的水位變化趨勢，反映社寮的含水層透水性相對較高，受地震的影響情況相對較小，含水層迅速平衡地震帶來的應變影響，進而使其同震反應的地下水位變化幅度與變化時間均相對較少。

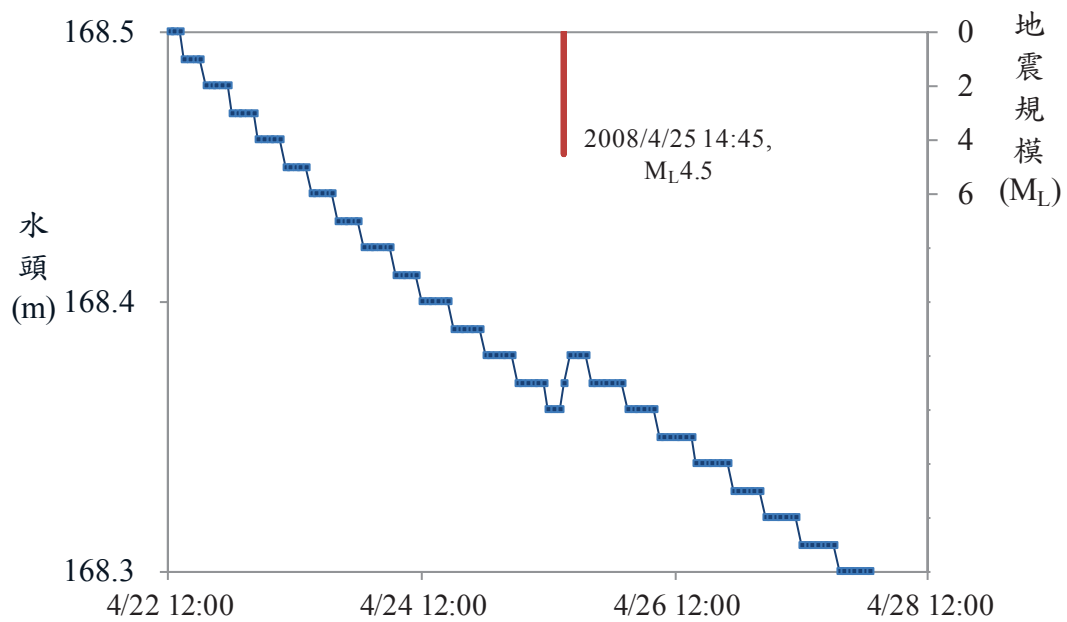


圖 5.10 時水位記錄 2008 年 4 月 25 日同震上升反應

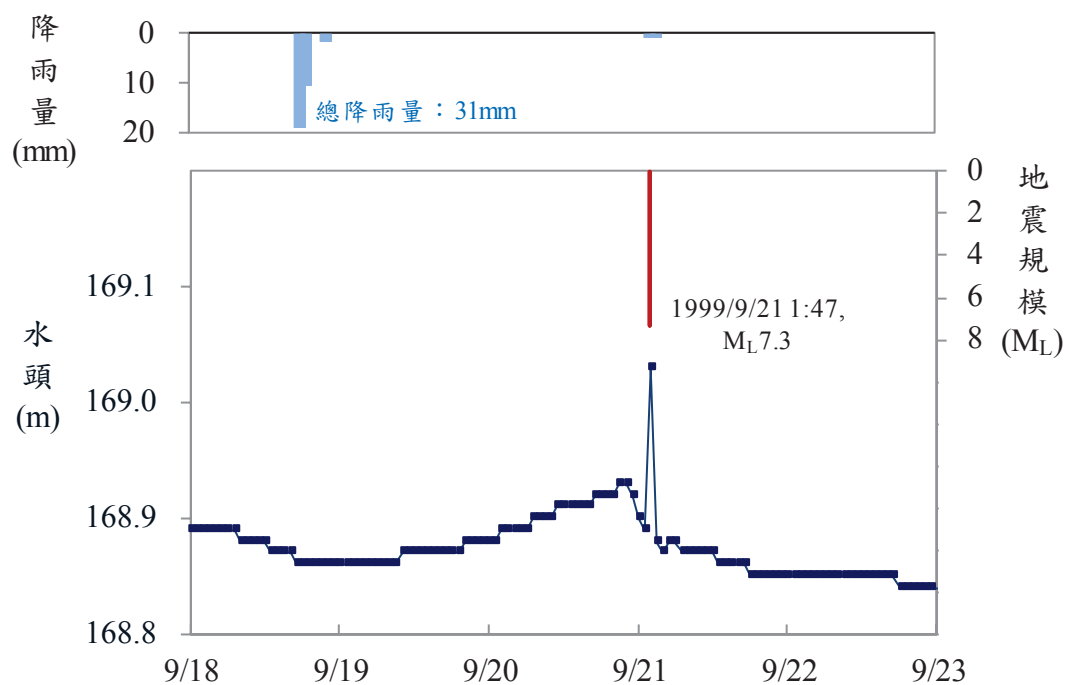


圖 5.11 時水位記錄 1999 年 9 月 21 日同震反應

統整社寮地下水位觀測井之高頻水位記錄的同震反應後(表 5.1)，以 0.2 公釐的解析度以及 1Hz 監測頻率的監測系統進行監測，自 2012 年 5 月開始監測後，總計 52 個地震造成社寮的地下水位產生反應，反應型態均為同震震盪式反應，所監測到的最小震盪幅度為 2.1 公釐，最大的震盪幅度為 9.21 公分，而在 52 個同震震盪反應當中，有 3 個為外海的遠震所引起，分別為 2011 年 11 月 6 日 10 時 59 分發生於台灣東北東方向外海，芮氏規模 6.9 的地震，造成社寮地下水位產生 2.83 公分的震盪變化；2012 年 4 月 11 日 16 時 38 分以及同日 18 時 43 分發生於蘇門答臘附近，芮氏規模分別為 8.6 與 8.2 的地震(圖 5.12)，造成社寮地下水位產生 8.7 以及 2.6 公釐的震盪變化。針對社寮地下水位觀測井的高頻水位記錄進行分析，顯示同震反應均屬震盪式反應，將之與同時間之時水位記錄比對，顯示時水位記錄的地下水位變化趨勢均未受地震影響，例如 2012 年 4 月 11 日兩次的蘇門答臘地震，水位變化即未受地震影響，檢視其他地震亦無明顯同震反應。

將社寮地下水位觀測井的時水位記錄以及本研究所監測得到的秒水位記錄一同與地震活動對比後，發現時水位所記錄到的同震反應與秒水位記錄到的同震反應型態略有不同。一般而言，自由含水層的同震反應以震盪式變化為主，受壓含水層的同震反應則可能出現持續式變化(Chia *et al.*, 2001)。自 2012 年 7 月開始的秒水位記錄顯示，同震變化均為震盪式反應變化，這是自由含水層對地震的預期同震反應。然而檢視社寮地下水位觀測井歷年時水位記錄的同震反應，自 1997 年至 2012 年僅出現 4 次同震反應，其中僅以 1999 年 9 月 21 日的集集地震造成顯著的同震震盪反應，其餘為水位記錄於地震發生當小時產生持續性的小幅上升變化，最大變化幅度為 3 公分，可能反應震後含水層受到擠壓，間接使較深處的地下水往地表方向移動，造成水位於震後產生小幅的上升。

表 5.1 2011 年 7 月至 2012 年 5 月社寮高頻水位記錄同震反應



時間	芮氏 規模	深度 (km)	震央距 (km)	震源距 (km)	震盪量 (cm)	備註
2011/7/1 6:47	4.6	50	110.0	120.9	0.21	
2011/7/2 4:49	3.9	22.3	98.8	101.3	0.38	
2011/7/3 20:30	4.8	68	152.9	167.3	0.8	
2011/7/6 13:22	4.5	15.6	117.7	118.7	0.56	
2011/7/6 19:58	4.9	17.6	118.2	119.5	1.39	
2011/7/7 1:42	4	17.3	118.1	119.4	0.31	
2011/7/7 1:55	4.2	18.9	117.2	118.8	0.39	
2011/7/12 19:17	5.3	31.2	87.9	93.3	4.65	
2011/7/18 2:45	4.6	25.9	88.5	92.2	1.95	
2011/7/18 22:48	5.1	29.8	169.8	172.4	0.43	
2011/8/11 3:25	4.5	27	104.7	108.1	0.39	
2011/8/12 6:07	4.8	32.4	91.5	97.1	0.56	
2011/8/24 21:15	4.8	33.7	116.0	120.8	0.7	
2011/8/25 12:00	4.9	25.2	142.9	145.1	0.74	
2011/9/9 11:26	4.8	10.4	168.4	168.7	0.7	
2011/9/12 13:15	5.3	43.8	216.3	220.7	0.43	
2011/9/22 6:18	5.2	17.2	101.3	102.8	1.92	
2011/9/22 8:55	4.2	17	101.0	102.4	0.4	
2011/10/20 1:22	4	5.8	96.9	97.1	0.52	
2011/10/30 11:23	6.5	215.8	297.7	367.7	2.08	
2011/11/6 17:36	4	9.9	75.7	76.4	0.48	
2011/11/8 10:59	6.9	209.5	645.6	678.8	2.83	台灣東北東
2011/11/12 9:38	5.1	21.1	222.8	223.8	0.44	
2011/11/21 3:14	4.4	31	87.8	93.2	0.52	
2011/12/2 8:55	4.8	21.1	108.3	110.3	0.86	
2011/12/4 13:00	4.8	61.1	168.0	178.8	0.26	
2011/12/5 20:30	4.4	20	82.0	84.4	1.3	

2011/12/8 06:07	4.4	65.1	116.9	133.8	0.26	
2011/12/14 19:12	4.8	38.5	121.1	127.0	0.61	
2011/12/15 8:35	4.6	24.9	108.1	111.0	1.91	
2011/12/17 03:45	4.1	10	88.6	89.2	1.8	
2011/12/23 3:39	5.2	9.2	186.5	186.7	0.48	
2012/1/4 14:59	4.7	9.2	91.6	92.1	0.48	
2012/1/18 14:57	4.1	6.6	34.1	34.7	0.3	
2012/1/21 8:50	4.9	18.9	159.7	160.9	0.31	
2012/2/4 10:54	5.6	114.1	220.5	248.3	0.52	
2012/2/23 11:30	3.8	3.8	95.1	95.1	0.39	
2012/2/23 13:01	4.2	48.2	100.2	111.2	0.26	
2012/2/26 10:35	6.4	26.3	117.5	120.4	3.04	
2012/3/1 10:45	4.3	18.1	72.2	74.4	0.74	
2012/3/22 07:44	5	42.5	108.2	116.3	0.96	
2012/4/3 04:41	4.3	28.9	104.9	108.8	0.34	
2012/4/8 03:59	4.7	30.2	104.1	108.4	1.82	
2012/4/9 05:43	5.7	29.2	168.7	171.2	1.87	
2012/4/11 16:38	8.6	22.9	3975.1	3975.2	0.87	蘇門答臘
2012/4/11 18:43	8.2	16.4	4154.1	4154.1	0.26	蘇門答臘
2012/4/12 18:39	4.6	12.8	62.0	63.3	0.26	
2012/4/19 09:58	5.5	29.1	102.8	106.8	9.21	
2012/5/1 20:35	4.1	61.2	77.2	98.6	0.29	
2012/5/20 12:50	3.4	8.3	28.2	29.4	0.34	
2012/5/30 15:25	4.7	6.6	72.7	73.0	0.87	
2012/5/31 14:58	4.1	5.2	101.1	101.2	0.26	

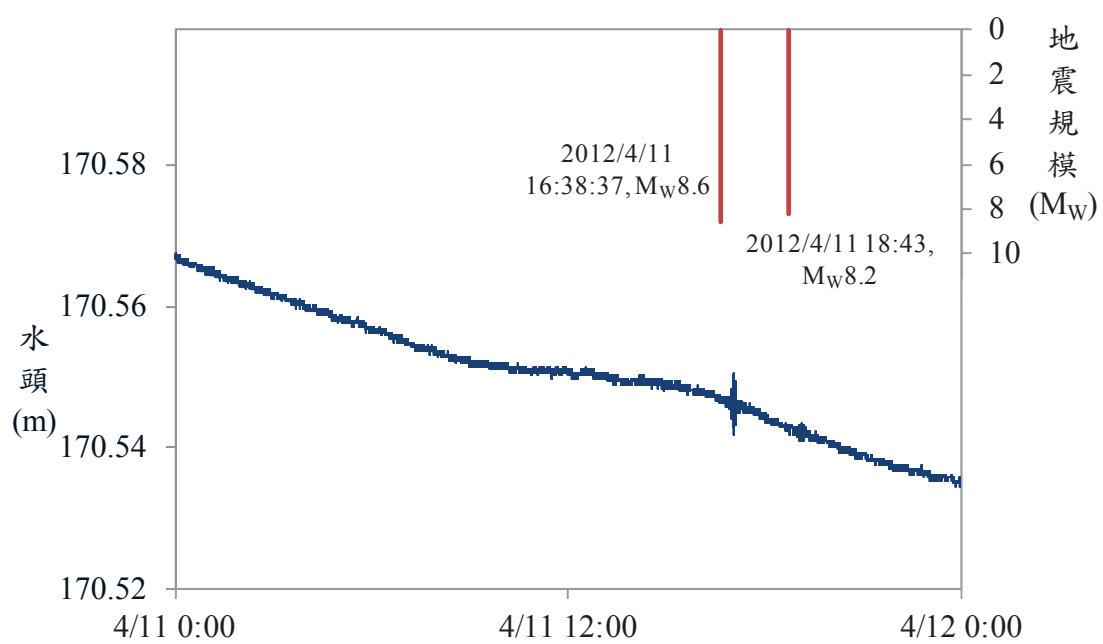


圖 5.12 秒水位記錄 2012 年 4 月 11 日對遠震反應

第六章 結論



1. 以沉水式壓力轉換儀作為核心元件的地下水監測系統，其組件的設定與配置方式，可能影響水位記錄之穩定性與正確性，造成錯誤的水位記錄。
2. 本研究在南投縣社寮國小觀測井建置高解析度高頻遠端地下水位監測系統，並於裝設之前在實驗室測試監測系統的各項組件，以確認監測品質，可以收錄我國解析度最佳的地下水位變化。
3. 分析社寮地下水位觀測井可知水位變化以雨季最為明顯，降雨是豐水期水位快速上升之主因。枯水期水位也會多次出現小幅上升，其中原因仍在探索中。
4. 社寮的地下水位記錄顯示低頻的時水位紀錄僅能觀察降雨後雨水入滲並補注含水層造成的水位上升反應；高解析度的高頻秒水位記錄則可觀察到降雨改變地表荷重衍生的地下水位細微變化。
5. 藉由分析社寮地下水位觀測井的水位變化，可知高解析度的高頻遠端地下水位監測系統可以精確的觀測地下水位對地震之反應，包括自由含水層的同震震盪式地下水位變化。

參考文獻



吳建民，1970，臺北盆地地層沉陷量之推估，經濟部水資源統一規劃委員會。

張建勛，1955，臺灣地下水問題的初步檢討，臺灣水利，第3卷，第1期，第19-28頁。

汪中和，郭欽慧，張鳳嬌，2004，臺灣地下水文環境的變遷，中央研究院地球科學研究所，經濟部中央地質調查所彙刊，第17號，175-196頁

林子平，2004，半導體封裝壓電阻應力計製作，國立成功大學工程科學系碩士論文，共61頁。

陳培源，2008，台灣地質。

江崇榮、賴典章、賴慈華、黃智昭、費立沅、侯進雄、陳瑞娥、陳利貞、呂學諭、周素卿、鄧忠信、黃明昌、陸挽中、張閔翔、劉幸樺、李耀文，1999，臺灣地區地下水觀測網第一期計畫—濁水溪沖積扇水文地質調查研究總報告，經濟部中央地質調查所。

Blanchard, F.B. and Byerly, P., 1935, A study of a well gauge as a seismograph. Bulletin of the Seismological Society of America, 25(4), 313-321

Bridgman, P. W., 1925, The effect of tension on the transverse and longitudinal resistance of metals. American Academy of Arts and Sciences, 60(8), 423-449

Buckingham, E., 1904, Contributions to our knowledge of the aeration of soils. U.S. Department of Agriculture, Bureau of Soils Bulletin, 52 p

Carr, P.A. and Van Der Kamp, G.S., 1969, Determining aquifer characteristics by the tidal method. Water Resources Research, 5(5), 1023-1031

Chia, Y., Wang, Y.-S., Chiu, J. J., and Liu, C.-W., 2001, Changes of groundwater level due to the 1999 Chi-Chi earthquake in the Choshui river Alluvial Fan in Taiwan, Bulletin of the Seismological Society of America, 91(5), 1062-1068

Clark, S.K. and Wise, K.D., 1979, Pressure sensitivity in anisotropically etched thin diaphragm pressure sensors. IEEE Transactions, Electron Devices, 26(12), 1887-1896

Cooper, H., Bredehoeft, J., Papadopoulos, I. and Bennett, R., 1965, The response of well-aquifer systems to seismic waves. Journal of geophysical research, 70(16), 3915-3926

David, F. H. and Wiley, J., 1994, Analog-to-digital and digital-to-analog conversion techniques. 397 p

Endale, D. M., Fisher, D. S., Jenkins, M. B., and Schomberg, H. S., 2010, Data quality assurance in pressure transducer-based automatic water level monitoring. American Society of Agricultural and Biological Engineers International

Everett, L. G., 1981, Monitoring in the zone of saturation. Ground Water Monitoring and Remediation, 1(1), 38-41

Garber, M.S. and Koopman, F.C., 1968, Method of measuring water levels in deep wells: U.S Geological Survey Techniques of Water Resource Investigations, Book 8, chap. A1, 23 p

Hsu, S.-K., 1998, Plan for a groundwater monitoring network in Taiwan, Hydrogeology Journal, 6, 405-415

Igarashi, G. and Wakita, H., 1991, Tidal responses and earthquake related changes in the water level of deep wells. Journal of Geophysical Research, 96(B3), 4269-4278

Isaac, J. W., 1970, Noninstrumental factors affecting measurement of static water levels in deeply buried aquifers and aquitards, Nevada Test Site. 8(2), 19-28

Jacob, C. E., 1940, On the flow of water in an elastic artesian aquifer. Transactions, American Geophysical Union, 21(2), 574-586

King, F. H., 1899, Principles and conditions of the movements of ground water. U. S. Geological Survey 19th Annual Report, 2, 58-294

Lawrence A. F., Carpenter, M. C., Rosenberry, D. O., Rousseau, J. P., Unger, R. and McLean, J. S., 1984, Use of submersible pressure transducers in water resources investigation. Techniques of Water Resources, 157 p

Maxey, G.B., 1964, Hydrostratigraphic units. Journal of Hydrology, 2, 124-129

Narasimhan, T. N., Kanehiro, B. Y. and Witherspoon, P. A., 1984, Interpretation of earth tide response of three deep, confined aquifers. Journal of Geophysical Research, 89(83), 1913-1924

O'Brien, G. M., 1992, Earthquake induced water level fluctuations at Yucca Mountain, Nevada, June 1992. U.S. Geological Survey, Open-File Report, 93-73

Roeloff, E., and Quilty, E., 1997, Water level and strain changes preceding and following the August 4, 1985 Kettleman Hills, California, earthquake. Pure and Applied Geophysics, 149, 21-60

Rosenberry, D.O., 1990, Effect of sensor error on interpretation of long term water level data. Ground Water, 28(6), 927-936

Sophocleous, M. and Perry, C. A., 1984, Experimental studies in natural groundwater recharge dynamics: Assessment of recent advances in instrumentation. Journal of Hydrology, 70, 369-382

Sophocleous, M., Bardsley, E., Healey, J., 2006, A rainfall loading response recorded at 300 meters depth: implications for geological weighing lysimeters. Journal of Hydrology, 319, 234-244

Staller, L., 2005, Understanding analog to digital converter specifications, Silicon Laboratories Inc.

Tufte, O. N., Chapman, P. W. and Long, D., 1962, Silicon diffused element piezoresistive diaphragms. 33(11), 3322-3327

Walden, R.H. , 1999, Analog-to-digital converter survey and analysis. IEEE Journal, Selected Areas in Communications, 17(4), 539-550

Weeks, E.P., 1979, Barometric fluctuations in wells tapping deep unconfined aquifers. Water Resources Research, 15(5), 1167-1176

Wu ,T.-Y., Jih , C.-T., Chen , J.-C., and Wu, C.-Y., 1995, A low glitch 10-bit 75-MHz CMOS video D/A converter. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 20(1), 68-72