

土壤水分張力自動量測系統率定與應用

Calibration and Application of Automatic Measurement System of Soil Moisture Tension

國立屏東科技大學
坡地防災與水資源工程研究所
博士班學生

陳智謀

Zhi-Mou Chen

國立屏東科技大學
環境工程與科學系
副教授

陳庭堅

Ting-Chien Chen

國立屏東科技大學
土木工程系
教授

葉一隆*

Yi-Lung Yeh

摘要

本文主要可以分成兩部份，一為土壤水分張力感應器之率定，主要是要瞭解土壤水分張力感應器之訊號處理程式，並以統計方法迴歸土壤水分張力值與土壤水分張力感應器之電壓值的關係。另一方面，本文于休耕水田進行蓄水實驗，以量測蓄水過程之土壤水份張力值變化。由率定試驗結果可得土壤水分張力值與土壤水分張力感應器電壓值之兩個羅吉斯迴歸方程式，此些方程式可精確應用於現地量測試驗之結果。此外，由分析可知土壤水分張力感應器之電壓值的反應區間為 1.26~5.05 伏特之間。而其適用之土壤水分張力值介於 20~199 分巴之範圍。

關鍵詞：土壤水分張力感應器，土壤水分張力值，電壓，羅吉斯迴歸方程式。

ABSTRACT

This paper included two parts: one is to generate the calibration process of Watermark sensor; the other is to use the sensor to measure soil moisture tension in field test. According to the calibration results, two regression equations were obtained between the soil moisture tension and the voltage of Watermark sensor. These equations were represented by Logistic regression. In addition, these equations were accurately used to express the soil moisture tension in field test. The experiment results showed that the voltage range of Watermark sensor is 1.26 to 5.05 volts and the soil moisture tension is 20 to 199 centibars.

Keywords: Watermark, Soil moisture tension, Voltage, Logistic regression equation.

*通訊作者，國立屏東科技大學土木工程系教授，91201 屏東縣內埔鄉學府路 1 號，yalung@mail.npust.edu.tw

一、前言

灌溉的首要目的在於滿足作物的需水量，所以對於土壤水分的掌握及控制是必要的工作。土壤水分的量測方式及量測設備的發展已有百年的歷史，近年來應用感應器與訊號轉換的機制，並配合記錄器及電腦系統的運算，發展出許多自動化土壤水分監控系統。

利用電阻式土壤水分張力計量測土壤水分之研究，Bouyoucos[1]使用尼龍製成土壤水分感應器來量測土壤水分張力，此研究提到土壤水分變化在濕潤範圍有較高的敏感度，在飽水、田間容水量與凋萎點狀態下阻抗值約為 150 Ω 、2.5 K Ω 及 300 K Ω 。Colman 與 Hendrix[2]使用玻璃纖維製成土壤水分感應器來量測土壤含水量。Phene 等[3]開發一種固定型的感應器，用來量測植物根部位置的土壤潛勢能，率定的原理是利用點源熱消散的速率變化與土壤含水量之關係，而此感應器雖然可與自動灌溉系統相連結，但其價格昂貴，若要應用於大面積的灌溉系統則須考量其經濟效益。Freeland[4]將導線埋入石膏內，探討石膏的電阻隨水分的增加而減少之關係曲線。張敏德等[5]對電阻式水分感應器進行一連串的率定試驗，由結果得知此類型的感應器適用於壤土質地之灌區或張力值介於 0.1~1 bar 之水分控制管理機制，此研究目前已運用於灌溉自動控制系統。而本文所用之 Watermark 感應器是由 Larson[6]所研發之低價位的電阻式感應器。Thomson 與 Armstrong[7]利用 Watermark 感應器進行相關的率定研究，此研究利用壓力鍋及恆溫裝置進行相關試驗，探討感應器在相同壓力下，溫度變化對於量測值之影響，此研究推導出一個非線性的土壤水分張力與感應器電阻變化的關係式。McCann 等[8]使用不同充填物取代 Watermark 感測器內部材料，結果顯示經由改善填充物的透水力可增加感測器的反應速率。郭勝豐與陳怡雯[9]將 Watermark 感應器應用於水旱田農業用水的相關研究，利用 Watermark 感應器做為現地水分傳輸機制的依據。本文針對電阻式水分張力感應器(Watermark)之量測資訊率定與

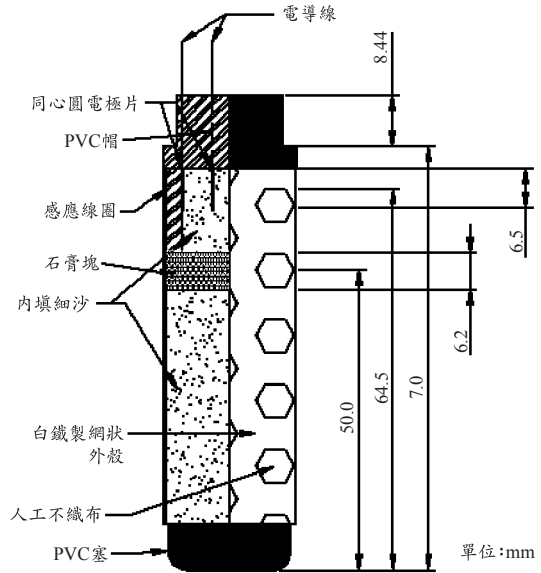


圖 1 Watermark 內部構造圖

應用進行探討，主要分析項目包含(1)利用迴歸分析，建立『訊號處理器(Watermark meter - 30 KTCD-NL)量測之土壤水分張力值』、『訊號記錄器(Data Logger)所記錄的電壓值』與『土壤水分張力感應器(Watermark)內部的飽和度』之關係式。(2)將此關係式應用於現地田區試驗的量測，以推估田區灌溉後土壤水分張力值的變化。

二、試驗儀器之率定

本文所使用之 Watermark 感應器之內部構造如圖 1 所示，為了方便於現地立即量測 Watermark 感應器所反應之張力值，圖 2 為一種攜帶方便的量測器，在此稱之為訊號處理器。此訊號處理器係利用類似惠斯登電橋(Wheatstone Bridge)原理，量測 Watermark 感應器電阻值的變化，其量測範圍為 500~30000 歐姆，轉換為 0.3~5V 電壓訊號輸出，再由內建的公式將電壓訊號值轉換成土壤水分張力值，土壤水分張力相應範圍為 0~199 分巴。而此量測讀值即為 Watermark 所反應的土壤水分張力值，其範圍為 0~199 分巴，其內建溫度修正程式，溫度修正範圍為 5~40 $^{\circ}\text{C}$ ，此感應器由於攜帶方便而常與 Watermark 搭配使用，做為現地灌溉管理之工具。

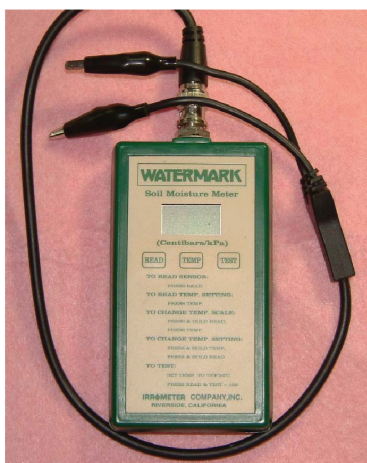


圖 2 Watermark 之訊號處理器

本文所使用的訊號紀錄器(Data Logger)會先將電池 12 伏特之電壓轉成 5 伏特之穩定輸出電壓，此電壓會沿著 Watermark 感應器一端之導線輸入，然後再由另一端導線回傳電壓資料，回傳之電壓讀數範圍一般介於 1~5 伏特之間。本研究利用試驗樣本發現，當 Watermark 感應器趨近於飽和且訊號處理器讀值為 0 分巴時，則電壓值約為 1.7 伏特，而當 Watermark 感應器趨近於乾燥且訊號處理器讀值為 199 分巴時，則電壓值為 5.05 伏特。

本文取用 23 顆 Watermark 感應器進行率定試驗，另外 4 顆作為率定之用。率定試驗流程共分三個部份進行，包括浸水試驗、乾燥試驗和 Watermark 感應器動態率定試驗，各試驗流程說明如下：(1)浸水試驗，將 Watermark 感應器浸泡在水中約 2~3 天，使其內部孔隙介質達到飽和的狀態，並使其訊號處理器讀數為 0 分巴，也就是使土壤水分張力值為 0 分巴，然後利用訊號記錄器詳細記錄此階段各感應器所反應電壓值及水溫之變化情形。(2)再將 Watermark 感應器置於烘箱中，以低於 50°C 之溫度，將感應器烘乾 48 小時，此時訊號處理器讀數應為 199 分巴，再將烘乾感應器連接於訊號記錄器上，記錄此狀態下的感應器反應之電壓值變化情形，此試驗稱為乾燥試驗。(3)將感應器浸泡於水中 2 天，然後再從水中取出並用乾布擦乾表面，再以乾布包裹，利用

表 1 浸水試驗過程感應器反應之平均電壓值

感應器編號	平均電壓值 (V)	感應器編號	平均電壓值 (V)	感應器編號	平均電壓值 (V)
1	1.957	9	1.858	17	1.259
2	1.920	10	1.902	18	1.976
3	2.065	11	1.665	19	2.121
4	2.129	12	1.780	20	1.842
5	2.042	13	1.726	21	2.153
6	1.951	14	1.903	22	1.722
7	1.905	15	1.951	23	1.751
8	1.523	16	1.397		

訊號記錄器記錄的過程中電壓值的變化，每隔一段時間，利用訊號處理器量測其土壤水分張力值，將乾布除去後以電子磅秤量測 Watermark 感應器之總重，動作完畢後再包裹新的乾布，並繼續用訊號記錄器記錄電壓值，反覆此動作直到試驗結束，此部分稱為 Watermark 感應器動態率定試驗。此量測過程從土壤水分張力值為 0 分巴時開始，直到土壤水分張力值為 199 分巴結束。在本階段之試驗，本文假設 Watermark 感應器浸泡於水中 2 天後，其內部已達到飽和狀態，所以當 Watermark 感應器從水取出後，迅速地以乾布擦拭其表面，此時之重量假設為 Watermark 感應器面乾內飽和之重量。其次，假設 Watermark 感應器置於烘箱中以 50°C 加以烘乾 2 天後，其感應器內部便達到完全乾燥之狀態，藉此求得 Watermark 感應器的淨重。藉由率定試驗可獲得『訊號處理器量測出的土壤水分張力值』與『訊號記錄器所記錄的電壓值』以及『Watermark 感應器內部的飽和度』等三者的關係。

由浸水試驗得知每一顆 Watermark 感應器在浸水狀態所反應之平均電壓值如表 1 所示，由此表可知此 23 顆 Watermark 感應器之電壓值介於 1.259~2.153 伏特之間，最大與最小值差距為 0.894 伏特，平均基本電壓值為 1.848 伏特，此值可表示 Watermark 感應器於正常狀態下，當土壤為飽和狀態時之電壓值下限。

乾燥試驗過程之電壓值隨時間變化如圖 3 所示，由此圖可知每一顆 Watermark 感應器之讀值

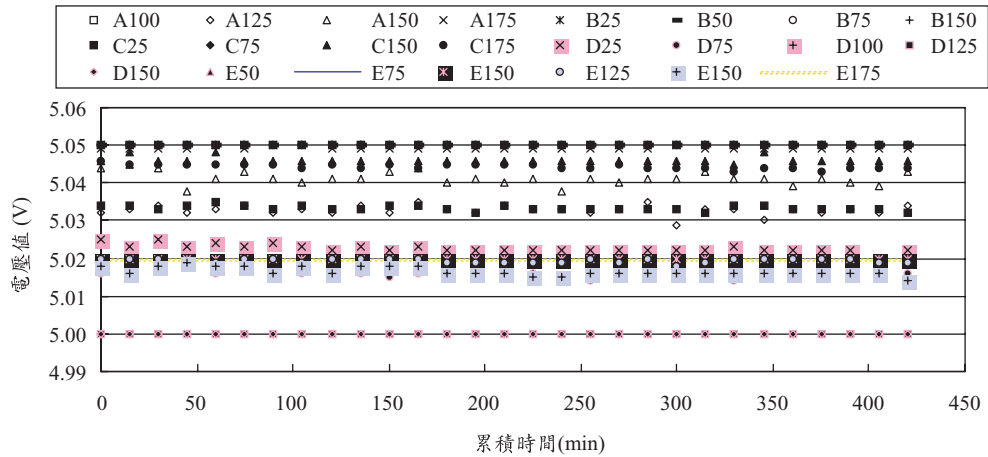


圖 3 乾燥試驗期間之 Watermark 電壓值紀錄

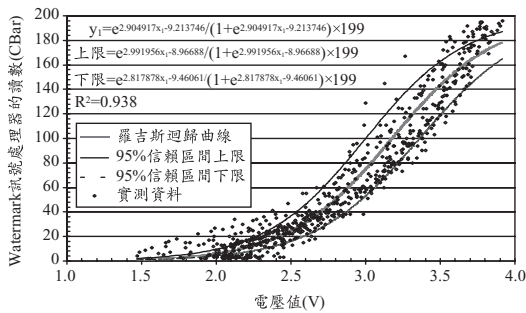


圖 4 訊號處理器量測之土壤水分張力值與電壓值關係

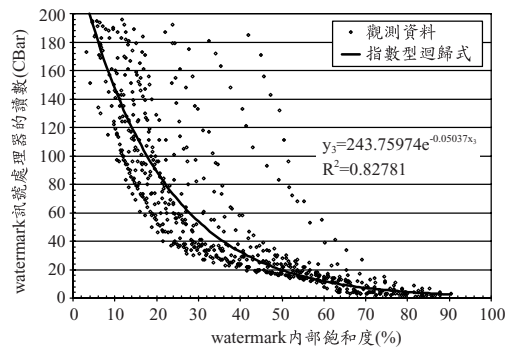


圖 6 訊號處理器量測之土壤水分張力值與 Watermark 感應器內部的飽和度關係

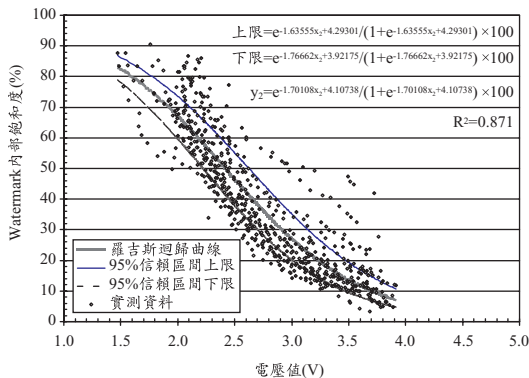


圖 5 電壓讀值與 Watermark 感應器內部飽和度之分析圖

幾乎都維持在固定之電壓值，此值為每一 Watermark 感應器的電壓上限值。由濕潤試驗及

乾燥試驗之結果可知 Watermark 感應器之電壓值之反應區間為 1.26~5.05 伏特。

由動態率定試驗結果可得訊號處理器量測之土壤水分張力值與電壓值關係示於圖 4，訊號記錄器所記錄的電壓值與感應器內部飽和度關係示於圖 5，由圖 4 與圖 5 可得訊號處理器量測之土壤水分張力值與感應器內部的飽和度關係示於圖 6。

由圖 4 可得知，S 形的曲線可以表現出當電壓值持續穩定增加的情況下，土壤水分張力值在初始階段緩慢增加，但張力值增加至約 20 分巴時，張力值便大幅上升，由此曲線可知電壓值與土壤水分張力值成正比。由羅吉斯分布可知土壤水份張力值在 0~199 分巴之間，而其率定數據之

羅吉斯迴歸式之 R^2 值為 0.938。利用羅吉斯模式可求得『訊號記錄器所記錄的電壓值』與『土壤水分張力感應器內部的飽和度』之迴歸式關係式，此迴歸式之 R^2 值為 0.817，由圖 5 曲線圖之讀數資料及迴歸曲線可知，當感應器內部飽和度低於 20%時，若感應器內部飽和度繼續下降，則電壓值便會大幅增加，此乃因低含水量時，欲使感應器內部兩電極環片產生電流，則需較大之電壓，水分若再持續散失，則導電更加不易，需輸入更大之電壓方使產生電流。圖 6 之曲線係綜合試驗所得『訊號處理器量測之土壤水分張力值』與『土壤水分張力感應器內部的飽和度』之關係，分析結果可知兩者為非線性反比，其套配之指數型迴歸方程式之 R^2 值為 0.828。

依據以上之分析結果可知，藉由羅吉斯迴歸分析『訊號處理器量測出的土壤水分張力值』與『訊號記錄器所記錄的電壓值』以及『土壤水分張力感應器內部的飽和度』與『訊號記錄器所記錄的電壓值』均可獲得良好之關係式，而此兩關係圖中之羅吉斯迴歸式在信賴度為 95%時之信賴區間上下限方程式之計算可由王濟川和郭志剛[10]及 David 和 George[11]所提羅吉斯信賴區間的劃定方法來決定。羅吉斯方程式表示為

$$y = \frac{e^{\alpha+\beta x}}{1+e^{\alpha+\beta x}} \dots\dots\dots(1)$$

其中 y 為羅吉斯方程的推估值， α 及 β 為常數項之係數，而 x 則為觀測資料。由羅吉斯方程式之定義可知 $\alpha + \beta x$ 為一線性方程或廣義線性方程，在此令 $b(x) = \alpha + \beta x$ ，故式(1)可轉換成

$$y = \frac{e^b}{1+e^b} \dots\dots\dots(2)$$

依據羅吉斯信賴區間的劃定規則，先取 $b(x)$ 劃定其信賴區間，可得 $b(x)$ 之上下信賴區間為 $\hat{b} \pm Z_{a/2} \times SE_{\hat{b}}$ ，此式中之 \hat{b} 為 $b(x)$ 的參數估計值，而 $SE_{\hat{b}}$ 則為 \hat{b} 的標準誤差，而 $Z_{a/2}$ 則為常態曲線下方中心部分 $100\% \times (1-a)$ 機率相連的臨界 Z 值，而 a 值為水準係數，再將此信賴區間之

計算結果代入式(2)，則可獲得 y 值的上下限為

$$\left(\frac{e^{(\alpha+\beta x)+Z_{a/2} \times SE_{\hat{b}}}}{1+e^{(\alpha+\beta x)+Z_{a/2} \times SE_{\hat{b}}}}, \frac{e^{(\alpha+\beta x)-Z_{a/2} \times SE_{\hat{b}}}}{1+e^{(\alpha+\beta x)-Z_{a/2} \times SE_{\hat{b}}}} \right)。$$

利用此計算方式可求得圖 4 之訊號處理器量測之土壤水分張力值與電壓值關係函數之上限為 $e^{2.991956 x_1 - 8.96688} / (1 + e^{2.991956 x_1 - 8.96688}) \times 199$ ，下限為 $e^{2.817878 x_1 - 9.46061} / (1 + e^{2.817878 x_1 - 9.46061}) \times 199$ ，而圖 5 之電壓讀值與 Watermark 感應器內部飽和度關係之上下限值分別為 $e^{-1.63555 x_2 + 4.29301} / (1 + e^{-1.63555 x_2 + 4.29301}) \times 100$ 及 $e^{-1.76662 x_2 + 3.92175} / (1 + e^{-1.76662 x_2 + 3.92175}) \times 100$ 。

由圖 4 可知當電壓值小於 2.5 伏特時，其樣本偏離上下限的數量較多，故使用本項設備時應注意其誤差，由圖 5 亦可知大部分的樣本落於上區間內，但仍有些樣本落於區間之外，樣本分布的位置可知分布於迴歸線下方的樣本較上方的多。而『訊號處理器量測之土壤水分張力值』與『土壤水分張力感應器內部的飽和度』之關係，由迴歸分析可得知其試驗數據之分布型態具非線性反比關係，即當土壤中含水量或飽和度下降時，土壤水分張力值則會相對增加，本文曾利用多種迴歸方程來分析，選擇指數型態之 R^2 為最大來表示。本文在此針對前兩項羅吉斯迴歸分析結果進行殘差分析，殘差圖示於圖 7 及圖 8。由圖 7 可知由訊號記錄器所記錄的電壓值推求土壤水分張力值，其殘差介於 ± 20 分巴之間，其殘差值隨著訊號記錄器所記錄的電壓值增加而放大的趨勢，由圖中的數據則可看出當讀數超過 3 伏特時，則會以較大之殘差值。由圖 8 可知訊號記錄器所記錄的電壓值推求 Watermark 感應器內部的飽和度，其殘差介於 $\pm 15\%$ 之間，資料分佈不具規律性。

三、儀器之應用與結果分析

本文將率定過之 Watermark 感應器應用於現地之量測試驗工作，以便日後落實於實際田區之量測工作。試驗區的總面積約為 2600 m^2 ，田區配置如圖 9 所示。試驗區共分成四個區域，其編號分別為 A 區、B 區、C 區及 D 區，而各區域的

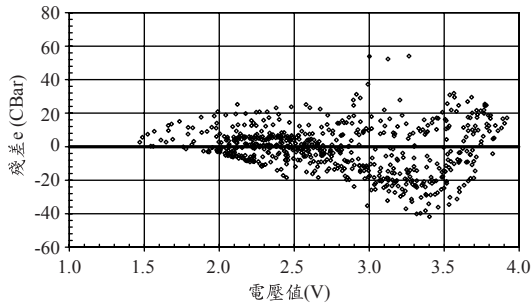


圖 7 電壓讀值轉換成土壤水分張力值之殘差圖

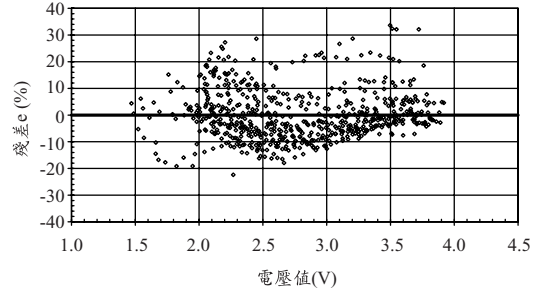


圖 8 電壓讀值轉換成土壤水分張力感應器內部的飽和度之殘差圖

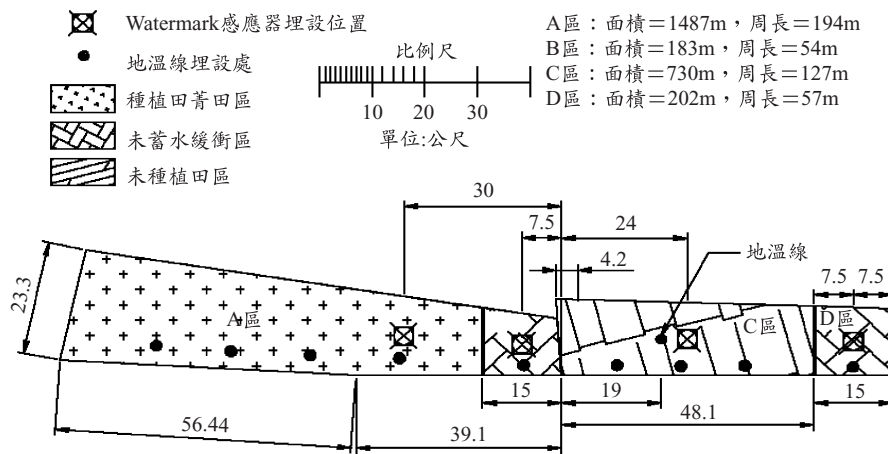


圖 9 試驗區平面配置圖

面積分別為：A 區 1487 m²，B 區 183 m²，C 區 730 m²，D 區 202 m²。其主要的試驗區分別為 A 區及 C 區。各分區利用土壤物性試驗的分析結果，如表 2 所示。試驗前，先以耕耘機將試驗田區翻耕整平，再進行各田區注水及排水使土壤穩定，然後再將各田區的周圍填築高約 30 公分的田埂。試驗期間，在 A 區種植田菁，而 C 區則未種植任何作物，並避免 C 區生長雜草，至於 B 區和 D 區為試驗區之緩衝區域。在每一試驗區埋設 Watermark 感應器。Watermark 感應器是以每隔 25 cm 深向下埋設，向下延伸至 175 cm，埋設情形如圖 10 所示，將埋設完成的 Watermark 感應器利用傳輸線連接至訊號記錄器。

本研究將以訊號記錄器自記的電壓值資料作為此部份之基本資料，並將此電壓值轉換成土

表 2 各田區之土壤分類結果

分層範圍以表層向下延伸(cm)表示之	A 區	C 區
表層到 30 cm	砂質粉土	砂質粉土
30~60 cm	含砂之粉土	砂質粉土
60~90 cm	含砂之粉土	砂質粉土
90~120 cm	砂質粉土	砂質粉土
120~150 cm	砂質粉土	砂質粉土
150~180 cm	砂質粉土	粉土質砂

壤水分張力值進行分析。由率定試驗所求的電壓值與土壤水分張力值的關係式，將試驗期間訊號所記錄之電壓值分別代入，以求得相對應之土壤水分張力值，此資料主要是用來表示土壤水分向下傳輸時土壤水分張力變化趨勢。圖 11 為 A 區

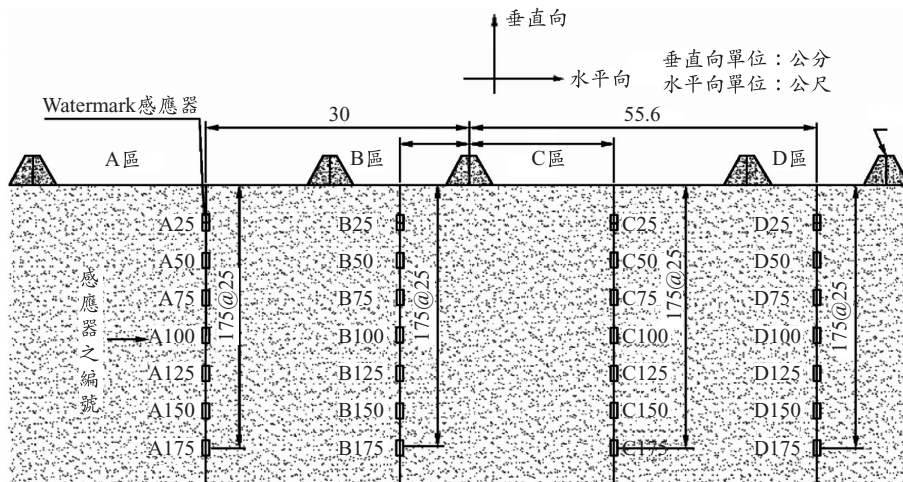


圖 10 試驗區 Watermark 感應器垂直配置圖

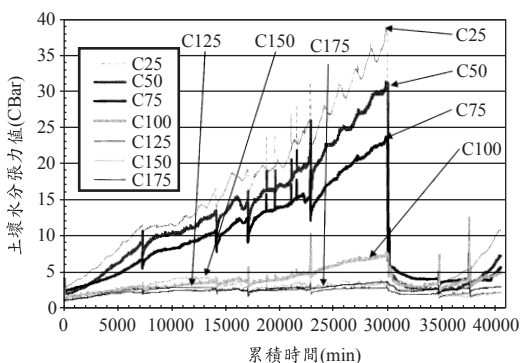


圖 11 A 區土壤水份張力值變化

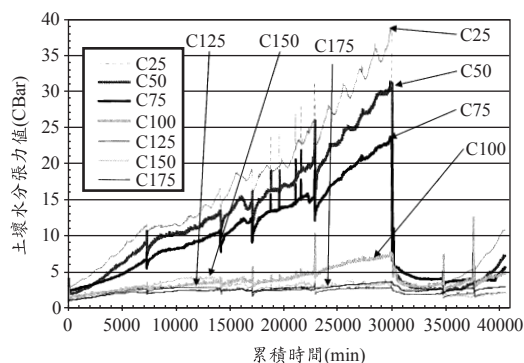


圖 12 C 區土壤水份張力值變化

試驗期間的資料，由此圖可知在深度為 25 cm 處的感應器之土壤水份張力值，在累積時間 27,000 分鐘之前，由於沒有明顯之降雨，在加上 A 區有種植田菁綠肥，由於表層的土壤水分被田菁綠肥給吸收，使得 A 區表層之的張力值迅速增加，而此期間有些時段有電壓值下降是由於在資料訊號擷取過程會造成訊號記錄器有電壓下降的現象，此現象為此型訊號處理器設計之缺失，此問題可以利用訊號記錄器改變通電之機制來改善，或者延後資料下載的時間來避免。而在 27,000 分鐘後因進行湛水入滲試驗及颱風所帶來的豪雨，使得試驗區處於濕潤之狀態。圖 12 為 C 區試驗期間土壤水份張力值之變化，本區除受 A 區湛水入滲試驗與降雨之影響外，並未種

植任何綠肥作物，使得此區之土壤水份張力值未如 A 區一般有快速上升的情形，埋於表層 25cm 深的土壤水份張力值也未如 A 區上升超過 100 分巴的情形，由於湛水入滲試驗而造成 C 區於累積時間 30,000 分鐘之後的土壤水份張力值有明顯之下降趨勢。

四、結論與建議

本文 Watermark 感應器率定試驗之浸水試驗可求得感應器的電壓值下限，由動態率定試驗，可得『訊號處理器量測之土壤水份張力值』與『訊號記錄器所記錄的電壓值』以及『土壤水份張力感應器內部的飽和度』等三者的關係式，而由乾燥試驗可得知感應器的電壓值均趨近於 5 伏特，

由分析可知 Watermark 感應器之電壓值之反應區間約為 1.26~5.05 伏特。另外，將試驗期間所擷取的電壓值轉換為土壤水分張力值可得其值介於 0 至 120 分巴，而曲線之趨勢與現地操作相吻合，故此系統可運用於現地土壤水分張力值之量測，並可得連續性之資料。而試驗期間有些時段之電壓值有下降現象，此為該型訊號處理器設計之缺失，但當下載資料結束後 12 小時，電壓值會漸漸回復為應有的電壓值，此問題可以利用訊號記錄器改變通電之機制來改善，或者延後資料下載的時間來避免。

參考文獻

1. Bouyoucos G J. Nylon electrical resistance method for the continuous measurement of soil moisture in the field. *Soil Sci*, 1949, 67: 319-330.
2. Colman E A, Hendrix T M. The fibreglas electrical soil-moisture instrument. *Soil Sci*, 1949, 67: 425-438.
3. Phene C J, Hoffman G J, Austin R S. Controlling automated irrigation with soil metric potential sensor. *Transactions of the ASAE*, 1973, 16(4): 773-776.
4. Freeland R S. Review of soil moisture sensing using soil electrical conductivity. *Transactions of ASAE*, 1989, 32(6): 2190-2194.
5. 張敏德，黃裕益，盛中德。電阻式土壤水分感應器之研究。農林學報，2002, 51(1)：15-28。
6. Larson G F. Electrical sensor for measuring moisture in landscape and agricultural soils. U. S. Patent No. 4531087, 1985.
7. Thomson S J, Armstrong C F. Calibration of the watermark model 200 soil moisture sensor. *Applied Eng. in Agric*, 1987, 3(2): 186-189.
8. McCann I R, Kincaid D C, Wang D. Operational characteristics of the watermark model 200 soil water potential sensor for irrigation management. *Applied Eng. in Agric*, 1992, 8(5): 603-609.
9. 郭勝豐，陳怡雯。嘉南灌區土壤水分特性曲線及水旱田農業用水之探討。2003 年農業工程研討會論文集，台灣，2003, 670-681。
10. 王濟川，郭志剛。Logistic 迴歸模型：方法及應用，五南圖書出版公司，台北，2003 年，第 150-226 頁。
11. David S. M., George P. M., *Introduction to the Practice of Statistics*, 5th edition, Freeman, 2005, 16-2-16-16.

收稿日期：民國 95 年 10 月 11 日

修正日期：民國 96 年 1 月 17 日

接受日期：民國 96 年 1 月 22 日