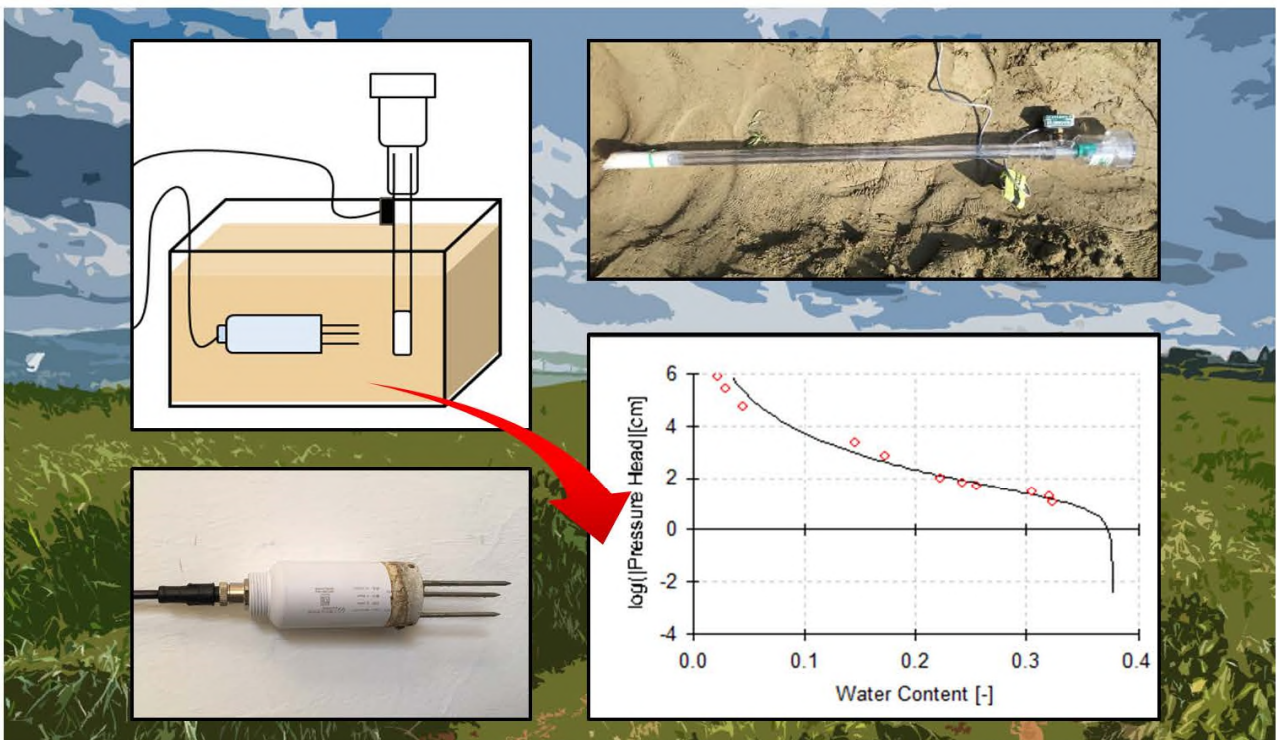


RETC軟體與TDR水分計於土壤水分 特性曲線方程式擬合之應用

成果報告書



行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國109年12月

計畫編號：109 保發-11.1-保-01-06-001(39)

**RETC 軟體與 TDR 水分計於土壤水分特
性曲線方程式擬合之應用**

**Application of RETC software and TDR
moisture meter to the equation fitting of
soil moisture characteristic curve**

執行單位：國立中興大學

執行期間：109 年 02 月 06 日至 109 年 12 月 31 日

計畫主持人：陳榮松 教授

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 109 年 11 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)

RETC 軟體與 TDR 水分計於土壤水分特性曲線方程式擬合之應用

摘要

土壤水分特性曲線在傳統上是藉由各種室內土壤物理試驗的方式來分段求得，不僅費時且無法得到完整的平滑曲線。因此，利用土壤水分張力計以及 TDR 水分感測器來直接連續量測土壤的基質勢能與對應時點之水分量，以獲取較為平滑且具連續性之土壤水分特性點，進而求取該曲線方程式已為近來常用的方法之一。

有鑒於此，本研究利用土壤水分張力計與 TDR 之現地實驗監測數據與室內砂箱實驗數據進行比較分析。分析中所需各項土壤物理特性則利用採樣帶回之土壤，透過各項土壤物理試驗求取之。此外，有關 RETC 軟體對於土壤水分特性曲線方程式的擬合中，除了觀測值外，也對於土壤水分量之極值理論點的必要性進行了模擬，以評估擬合曲線與實測值之間的差異。

由分析結果可知，TDR 利用在土壤水分監測上，確實可解決傳統烘乾法在取樣與操作上的盲點與不便，有助於 RETC 軟體取得完整的特性曲線方程式，且在擬合特性曲線時也有必要加入土壤水分之極值理論點。最後，若僅以田間容水量(pF 1.8)至生長受阻點(pF 3.0)來看，室內外實驗誤差不大，以室內實驗取代室外現場實驗將可避免室外實驗可能造成的觀測誤差。

關鍵詞：RETC、TDR、土壤水分特性曲線

Application of RETC software and TDR moisture meter to the equation fitting of soil moisture characteristic curve

Abstract

Soil water characteristic curves have traditionally been segmented and measured by various indoor experiments, which is time-consuming and unable to obtain a complete smooth curve. Therefore, the use of soil moisture tensiometers and TDR moisture sensors to directly and continuously measure the potential energy of the soil matrix potential and the moisture content at the corresponding time points to obtain smoother and continuous soil moisture characteristic points and the curve equation has become a recent trend. In view of this, this study uses the field experimental monitoring data of soil moisture tensiometer and TDR to compare and analyze the indoor sand box experimental data. The various soil physical properties required in the analysis are obtained through various soil physical experiments using the soil brought back by sampling. In addition, in the fitting of the equation of the soil moisture characteristic curve with the RETC software, in addition to the observed value, the necessity of the theoretical point of the extreme value of the soil moisture content was also simulated to evaluate the difference between the fitted curve and the measured value. It can be seen from the analysis results that the use of TDR in soil moisture monitoring can indeed solve the blind spots and inconveniences of traditional drying methods in sampling and operation, and help the RETC software to obtain a complete characteristic curve equation. And it is necessary to add the theoretical point of the extreme value of soil moisture when fitting the characteristic curve. Finally, if only the field water capacity (pF 1.8) to the growth hindered point

(pF 3.0) is analyzed, the indoor and outdoor experiments have little error, and the indoor experiment can replace the outdoor field experiment to avoid the observation error that may be caused by the outdoor experiment.

Keywords: RETC, TDR, Soil water characteristic curve

目次

摘要.....	I
Abstract.....	II
目次.....	IV
表次.....	VI
圖次.....	VII
第一章 前言	1-1
第一節 計畫緣起及目的	1-1
第二節 計畫範圍	1-2
第三節 計畫目標	1-2
第四節 工作項目及內容	1-2
第五節 計畫流程	1-4
第二章 文獻回顧	2-1
第一節 土壤水分特性曲線	2-1
第二節 TDR 水分感測器之應用	2-2
第三節 土壤水分特性之相關概念	2-3
第四節 儀器埋設深度之考量	2-4
第三章 研究理論及方法	3-1
第一節 土壤水分特性曲線之取得	3-1
第二節 現場土壤水分特性曲線試驗	3-2
第三節 室內土壤水分特性曲線試驗	3-2
第四節 土壤水分特性曲線擬合	3-3
第五節 RETC 模式介紹	3-3
第六節 研究分析評鑑指標	3-5
第四章 試驗地介紹與儀器架設	4-1

第一節	試驗地位置及環境介紹	4-1
第二節	試驗地設備介紹	4-2
第三節	現場儀器架設	4-5
第五章	試驗結果與分析討論	5-1
第一節	試驗地土壤物理特性分析	5-1
第二節	TDR 水分感測器校正試驗	5-1
第三節	室內土壤水分特性曲線試驗	5-3
第四節	現場與室內土壤水分特性曲線模擬結果	5-5
第五節	現場與室內土壤水分特性曲線模擬結果分析	5-9
第六章	結論與建議	6-1
第一節	結論	6-1
第二節	建議	6-1
參考文獻.....		參-1
附錄.....		附錄-1
附錄一、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形		附錄-1
附錄二、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形		附錄-4
附錄三、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形		附錄-6

表次

表 3-1 評鑑指標公式表	3-5
表 4-1 觀測儀器設備規格功能列表	4-3
表 5-1 土層之土壤類別與粒徑組成	5-1
表 5-2 土壤物理特性分析	5-1
表 5-3 採土法與 TDR 監測值紀錄	5-2
表 5-4 室內外實驗之土壤物理特性相關數據	5-4
表 5-5 RETC 模擬之現場試驗之收斂參數	5-6
表 5-6 RETC 模擬之室內試驗之收斂參數(未加入極值理論點)...	5-7
表 5-7 RETC 模擬之室內試驗之收斂參數(加入極值理論點)	5-8
表 5-8 土壤水分曲線之相關係數 R^2 值及 CE 值	5-9

圖次

圖 1-1 研究方法與步驟流程圖	1-5
圖 2-1 利用 TDR 與水分張力計進行土壤水分調查示意圖	2-2
圖 2-2 pF 值變化之土壤水分狀態圖	2-3
圖 2-3 各別深度土層含水率實測值與總土層平均含水率比較	2-5
圖 3-1 傳統試驗求取特性曲線示意圖	3-1
圖 3-2 土壤水分張力計(左)與高感度精密 TDR 水分感測器(右) ...	3-3
圖 3-3 RETC 介面操作圖	3-4
圖 4-1 台南學甲地區示意圖	4-1
圖 4-2 業灌溉試驗場及試驗地區域圖	4-2
圖 4-3 土壤含水率觀測站各項儀器示意圖	4-4
圖 4-4 現場試驗地挖掘作業	4-5
圖 4-5 學甲試驗地觀測站	4-6
圖 5-1 校正試驗過程	5-2
圖 5-2 TDR 體積含水率校正曲線與校正公式	5-3
圖 5-3 土壤水分特性曲線之室內試驗配置圖	5-4
圖 5-4 學甲現場與室內土壤水分特性曲線實測值	5-5
圖 5-5 RETC 模擬學甲地區之現場土壤水分特性曲線成果圖	5-6
圖 5-6 RETC 模擬學甲地區室內試驗土壤水分特性曲線成果圖(未加入極值理論點)	5-7
圖 5-7 RETC 模擬學甲地區室內試驗土壤水分特性曲線成果圖(加入極值理論點)	5-8
圖 5-8 學甲地區 RETC 模擬現場與室內實驗土壤水分特性曲線比較圖	5-9

第一章 前言

第一節 計畫緣起及目的

一、計畫緣起

近年來在氣候極端化的趨勢下，降雨量逐漸有朝向兩極化發展的趨勢，以致乾旱情勢與往常相較也益為嚴重。在寶貴的水資源取得不易的情況下，水資源之利用與管理更顯為重要，尤其在農業上亦是相當重要的一環，若土壤水分特性曲線能應用於作物灌溉上，將有助於簡易地透過土壤的乾溼狀態來判斷灌溉的時機，使得來不易的農業水資源獲得最有效的運用，透過此等對於節省農業用水的努力，以提供在未來水資源有限的情況下，能合理的調配利用水資源。

在土壤的物理特性中，土壤水分含與基質勢能之相互關係常以土壤水分特性曲線描述之，土壤水分特性曲線在傳統上通常是藉由各種室內試驗的方式來進直接測，但因經由試驗所得之量測據有限，因此連接各點量測結果並無法得到平滑的續曲線，再加上因各種土擾物理試驗程序繁瑣，往往需耗費相當長的時間方能得到試驗數據。

另一方面，如在現場選擇以土壤水分張力計以及 TDR 水分感測器來直接連續量測土壤的基質勢能與同時點的水分量不失為一有效且快速的方法，然而土壤水分張力計雖然方便直接讀取基質勢能，但其卻需要經常補充儀器內被消耗掉的水分，一旦裝設在現場，必須克服此等在儀器管理與維護上的困難。

綜觀上述可知如何快速獲取一具連續性且具代表性之土壤水分特性曲線的重要性。

二、計畫目的

本研究將利用美國所發展之 RETC 套裝軟體，透過 van Genuchten (1980)模型來擬合出土壤水分特性曲線方程式，初步探討以壓克力砂箱試驗之室內試驗數據取代室外試驗數據的可行性。並以土壤物理性數據、土壤水分特性試驗數據的多寡來進行所擬合方程式間的差異性分析，並探討如何獲致最佳化的方程式參數組、各參數組之實用性分析以及現場與室內試驗所求得土壤水分特性曲線間之相關性等。

第二節 計畫範圍

本研究範圍以嘉南農田水利會農業灌溉試驗場所轄之試驗區為主。

第三節 計畫目標

本研究將透過水分張力計、TDR 水分感測器來收集各乾溼狀態下之土壤基質勢能值及土壤含水率數據，並以土壤物理特性為條件，藉由 RETC 套裝軟體擬合出最佳土壤水分特性曲線方程式，並探討在實務上以室內試驗數據取代現場試驗數據的可行性。

第四節 工作項目及內容

一、試驗地之設定與土壤特性調查

本研究規劃再有專人進行管理之地區來建立試驗地，即時監看儀器狀態。另外透過採集試驗地之土壤樣本，分別進行各種土壤物理性試驗，提供後續現場所監測之土壤基質勢能值及含水率數據進行土壤水分特性曲線擬合分析。

二、試驗地之土壤物理性試驗

利用採集所得之土壤樣本，進行土壤之級配試驗(篩分析和比重計分析)，以分析土壤質地類別與粒徑組成。另使用金屬採土器挖取不同深度之土樣帶回，並先秤其濕土重後進行烘乾，在秤其乾土重獲得含水率及乾單位重，最後進行土粒比重試驗，再利用先前的含水率及乾單位重，以求出土壤密度、孔隙率、土壤三相分布等土壤一般物理性質。

三、試驗地與室內特性曲線試驗

(一)利用 TDR 水分感測器配合土壤水分張力計等工具來進行土壤水分特性試驗，而為了 TDR 的量測值能代表實際的水分含量，本研究在進行實際量測前必須進行介電常數的校正，在不同乾溼狀態下同時量取 TDR 監測值與土壤採樣，並將樣本經烘乾後之水分含與 TDR 監測值比對，藉以推求出校正公式。

(二)現場試驗將以旱田灌溉現場作為監測對象，室內試驗則利用壓克力砂箱試驗進行之。兩者皆利用水分張力計和 TDR 水分感測器雙雙插入相同深度之土層中來進行土壤基質勢能與水分量的監測，並將試驗地與室內試驗中分別利用張力計與 TDR 水分感測器所測得之大量監測數據進行繪圖，並進行試驗數據誤差比較分析。

四、試驗地與室內特性曲線方程式化

利用由美國發展之 RETC 軟體並基於 van Genuchten(1980)模型來擬合土壤水分特性曲線方程式，將其方程式化，並進一步分析預先

輸入之土壤物理性數據多寡所造成的差異性、各特性曲線本身之實用性等，並探討如何獲致最佳化的方程式參數組。

五、試驗地與室內特性曲線差異分析

運用土壤水分特性曲線公式，找出試驗地及室內試驗中相對應之土壤水分張力與土壤含水量，分析土壤水分特性曲線間的差異性，並利用誤差評估函數，對現場曲線值與室內試驗曲線值之關係進行推估效能之量化評鑑，以探討在實務上以室內試驗數據取代現場試驗數據的可行性。

第五節 計畫流程

依計畫目的與工作項目內容，本研究之研究方法與步驟如下，流程圖如圖 1-1 所示：

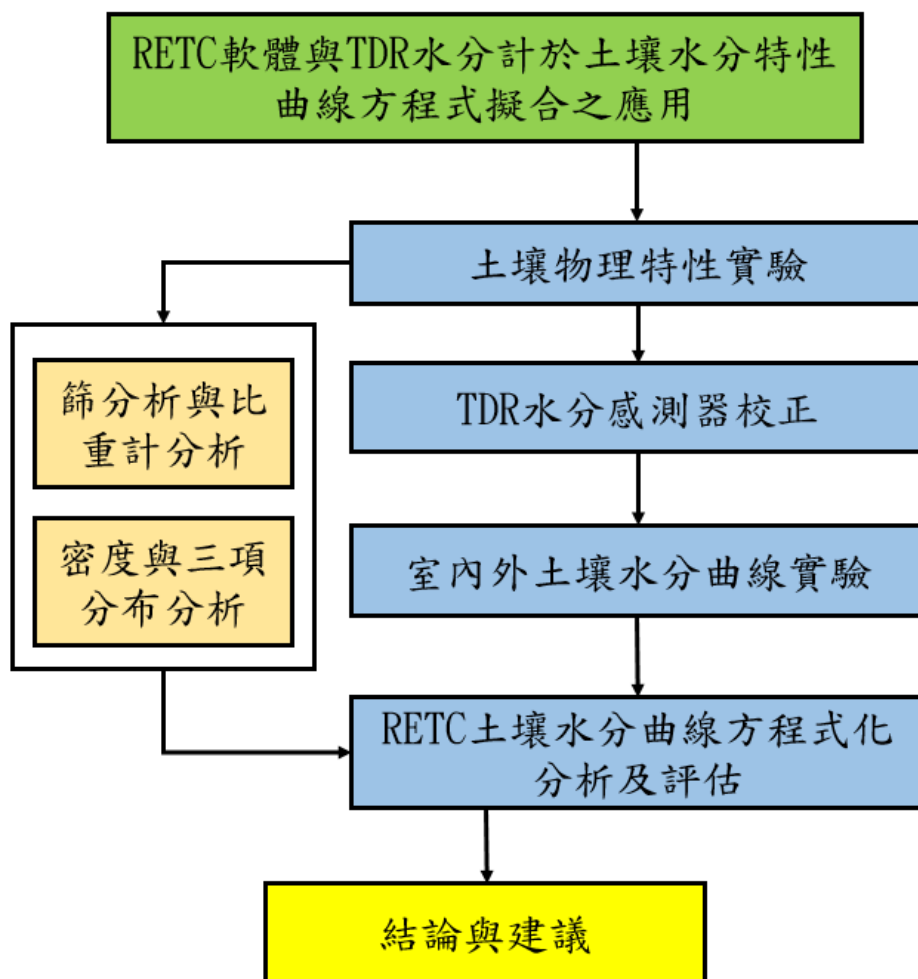


圖 1-1 研究方法與步驟流程圖

第二章 文獻回顧

近年來由於 TDR(時域反射)技術的進步與普及，在國外如日本已逐漸將該項儀器用來即時量測土壤的含水量上，而此項技術可透過由美國所發展之 RETC 套裝軟體，以 van Genuchten (1980)模型來快速擬合出土壤水分特性曲線方程式。有鑑於此，本章節將先就土壤水分特性曲線、TDR 的技術與其針對土壤水分量測之應用等相關資料進行介紹如下：

第一節 土壤水分特性曲線

土壤水分特性中，土壤的含水量與基質勢能之相互關係普遍以土壤水分特性曲線來描述。土壤之粒徑分布與水分特性曲線，通常是藉由試驗的方式進行直接量測，但試驗數據測得結果是非連續性的，有時因不同之研究或工程需要，欲得知之性質未必可在試驗中測得。因此，運用模式對試驗數據進行擬合得到最佳曲線亦為一重要工作。求取土壤水分特性曲線之試驗過程繁瑣且非常耗時，欲測得較完整之水分特性曲線資料所需進行的試驗往往需耗費一個月以上的時間。因此，為了能夠節省試驗的時間與人力，許多學者便提出不同的方式來求得土壤水分特性曲線(陳威竹，2013)(大槻恭一，2016)。

土壤水分特性曲線可以透過兩種方法獲得，一是排水試驗法，自水分飽和的土樣開始，逐漸施加吸力使土壤排水，並同時測定濕度與吸力；二是吸水試驗法，由原本乾燥的土樣漸漸濕潤，同時測定濕度與吸力。這兩種方法皆能得到一連續曲線，但同樣的土壤得到的兩曲線通常會不同，在同一基質勢能下排水曲線之土壤濕度會高於吸水曲線的溼度，此平衡因過程方向不同，而土壤水分含量及狀態有所差別，

稱之為「遲滯現象」(陳威竹, 2013)。在此考量到實際應用到田間灌溉水量評估時的狀況, 本研究將以由濕至乾時之變化曲線作為代表。

第二節 TDR 水分感測器之應用

以往利用土壤水分減少法來推估消費水量時, 一般會利用土壤水分張力計來量測 pF 值, 並經由室內試驗所求得之特性曲線來換算出土壤的體積含水率。另外 Topp 等人於 1980 年利用 TDR 量測不同粒徑土壤之含水量, 進而提出含水量與介電常數間之經驗公式後, TDR 技術迅速發展至今, 更方便了土壤水分數據的取得。此次本研究亦將利用 TDR 水分感測器等工具來進行室外田區土壤水分調查試驗, 如圖 2-1 所示。



圖 2-1 利用 TDR 與水分張力計進行土壤水分調查示意圖

TDR 水分感測器因製造商或開發團隊的不同, 其感測值的輸出方式亦有差異, 有的會直接以體積含水率輸出, 有的則會以如(μ Sec)等介電常數值輸出, 然而因 TDR 的輸出值與體積含水率的關係會因土壤不同甚至有機質含量等的不同而異, 因此不論是直接以體積含水率輸出的 TDR 亦或是經由室內試驗所求的率定曲線(TDR 讀取值與體積含水率之秤重值的關係), 均有修正的必要。

第三節 土壤水分特性之相關概念

本研究運用到的各項土壤水分特性相關名詞說明如下：

1. pF 值：土壤水分張力在溫度攝氏 21 度所表示水柱高(公分)之常用對數值，作為土壤乾濕程度之指標。
2. 24 小時田間容水量：土壤中之重力水已排出，土層中水分下降速度近乎為零，此時土之含水量稱為田間容水量。或指土壤在水分飽和後任其自然排水，待自然排水停止時，所含之水量稱之。
3. 生長阻害水分點：根據前人研究，一般土壤的永久凋萎點的值大約在 pF 4.2，此時植物的根已無法吸收水分，但對植物而言超過一定水分下限，約在 pF 3.0 時會發生植物的生長阻礙，影響植物正常發育。圖 2-2 為隨 pF 值變化之土壤水分狀態圖。根據土壤的不同有時也會有數值上的變動，如砂土的生長阻害水分點的 pF 值在 3 以下，壤土則在 pF 值 3 之上，其可由土壤水分減少法來實測水分減少量，水分消耗量顯著減退之土壤水分需要進一步調查。另外作物種類跟灌溉水質亦都會對其產生影響。

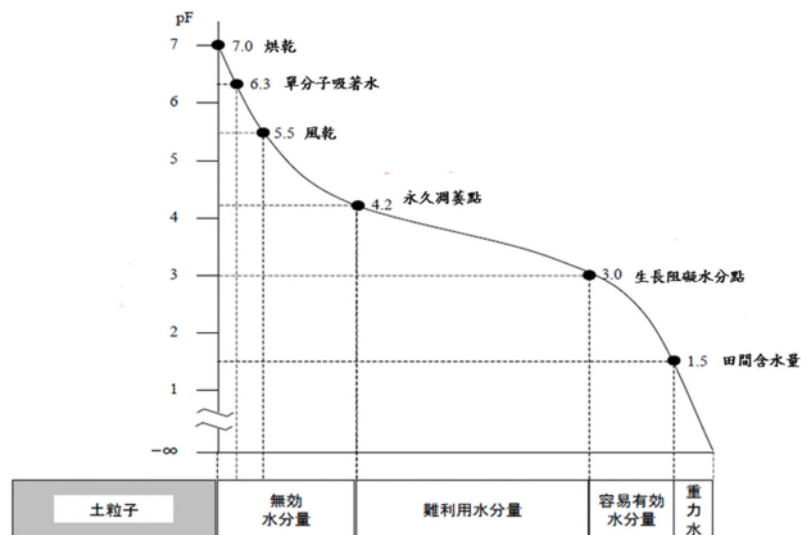


圖 2-2 pF 值變化之土壤水分狀態圖

(來源：大槻恭一，2016)

第四節 儀器埋設深度之考量

根據「平成 27 年度東播地區計畫基準調查業務報告書」(中村公人, 2016)內容記載, 使用 TDR 於不同深度(5、15、25、35、50cm)含水率實測結果與總土層 60cm 之平均含水率實測結果, 如圖 2-3 所示。比較各別土層與總土層平均含水率之相關係數 R^2 值來看, 25 公分土層(20~30 公分)為 0.9, 其值最高, 故對此案例而言以 25 公分土層之含水率變化應可代表總土層平均含水率變化。倘若在現地實測及應用上, 基於成本考量與應用的方便性只使用一支土壤水分感測器時, 則建議可直接埋入 25 公分土層處以監測其含水率變化, 而其結果可視為總土層平均體積含水率變化, 並以此作為模式實測值比較與修正之用(林暉恩, 2018)。

據此於本研究之室外與室內試驗中, TDR 水分感測器及張力計均埋入土中 25 公分處來視為總土層平均體積含水率變化, 並藉其監測數據推求土壤水分特性曲線, 以進行後續各曲線之比較分析。

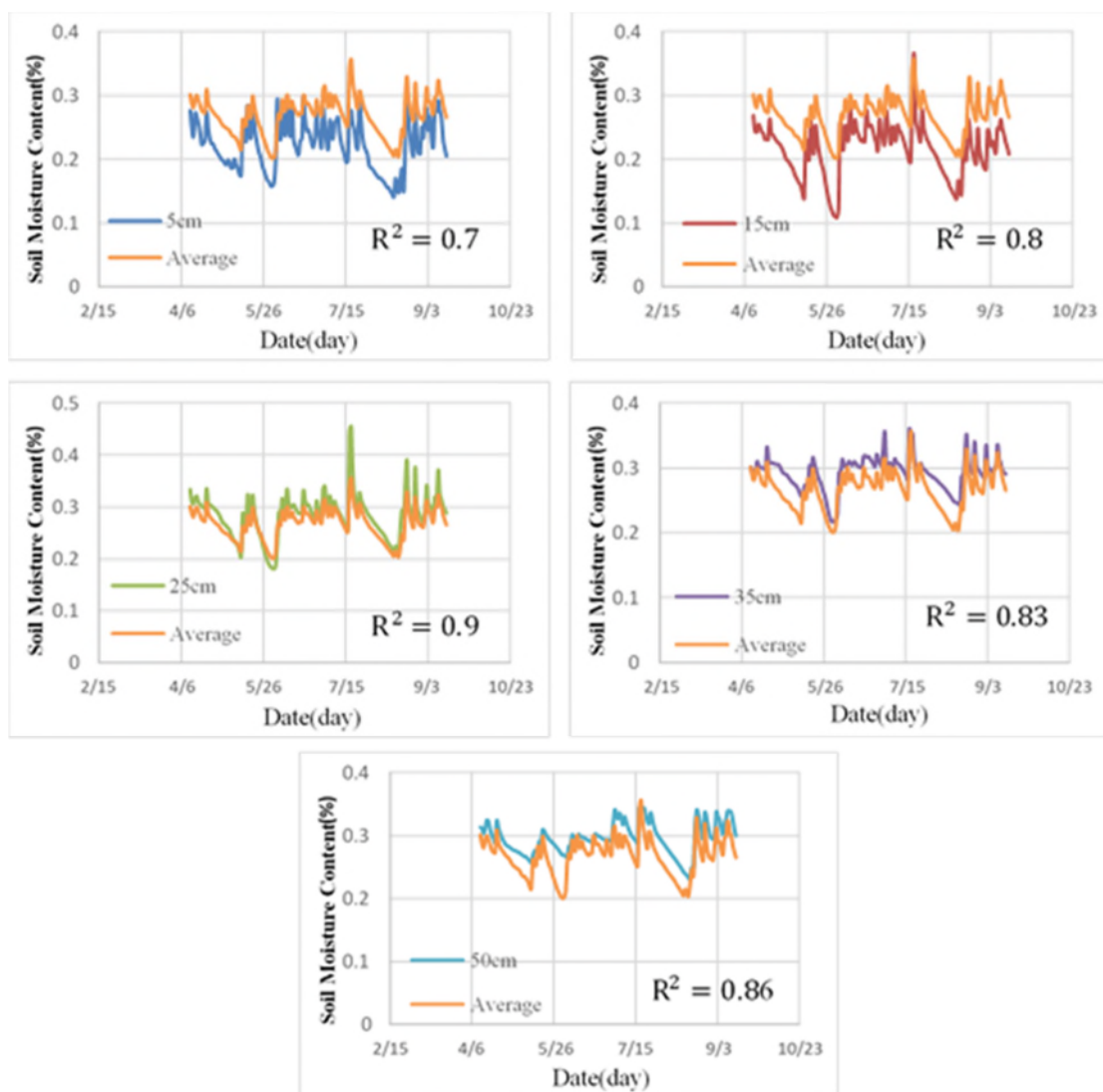


圖 2-3 各別深度土層含水率實測值與總土層平均含水率比較

(來源：林暉恩，2018)

第三章 研究理論及方法

第一節 土壤水分特性曲線之取得

為了取得足以構成曲線之土壤水分張力與相對應之體積含水率值點，在傳統性的試驗室做法包括會利用蒸氣壓法、離心法、吸引法、砂柱法等來取得 pF 0~6 的土壤水分張力值點，而相對應之各時點的體積含水率值則需透過土壤採樣、24 小時烘乾、秤重計算等程序來求得，如圖 3-1 所示。綜觀整套土壤水分張力值及體積含水率的求取，不僅需要一應的土壤物理試驗設備，更需花費約 1.5~2 個月的時間方能完成，相當費時且不方便，亦常常僅能得到點與點相連之整條折線型的特性曲線，而無法繪製出平滑的特性曲線。

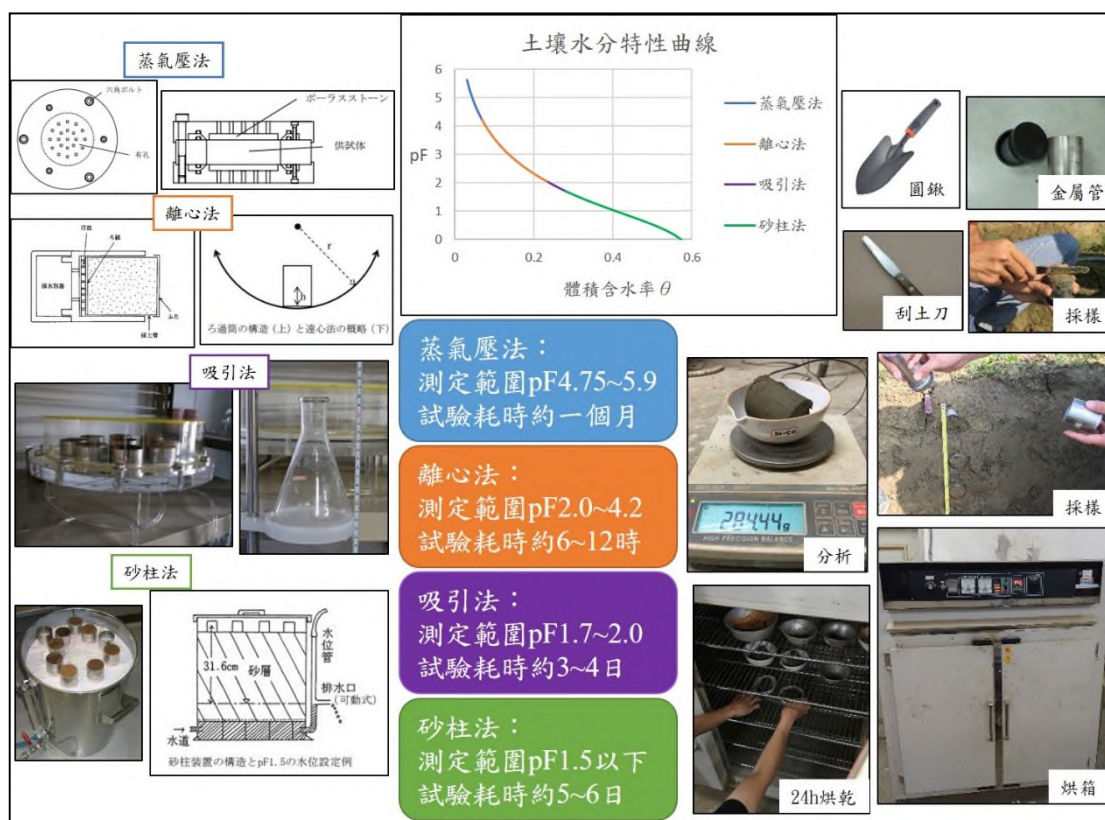


圖 3-1 傳統試驗求取特性曲線示意圖

為改善試驗室分階段、花時間以各種試驗取得土壤水分張力值的做法，經常會選擇利用土壤水分張力計來直接量測土壤的基質勢能，惟在現場埋設土壤水分張力計的情況下，較為精準的張力計需要經常性地至現場補充儀器內消耗掉的水分，有其不方便之處，況且利用土壤水分張力計因作物栽培的關係，通常僅會量測到適於作物生長之正常土壤水分的範圍，至於土壤特別乾或特別濕的值則經常會量不到。再加上需要在現場同一地方就不同土壤乾濕度進行採樣，過程亦相當繁瑣而不易配合進行。

第二節 現場土壤水分特性曲線試驗

本研究預計將儀器架設於嘉南農田水利會農業灌溉試驗場所轄之學甲試驗區，應用 TDR 水分感測器以及張力計設置在 25cm 處來觀測土壤之體積含水率及基質勢能。測量期間以 60 分鐘為間隔監測土壤體積含水率。在儀器裝設完畢後，將定期進行儀器設備的維護管理使儀器得以正常運作、收取監測數據。另外透過採集試驗地之土壤樣本，進行各種土壤物理性試驗(包括土壤質地、土粒比重試驗)，提供後續監測之土壤基質勢能值及含水率數據，以利用 RETC 程式進行土壤水分特性曲線擬合分析。

第三節 室內土壤水分特性曲線試驗

本研究為解決現場試驗的諸多條件限制，所採取的對策為挖取足夠之現場旱田土壤將其帶回試驗室，以相同試驗手法進行室內試驗，藉以與現場試驗進行對照與比較。

本研究所採用之土壤水分張力計與高精度 TDR 水分感測器如圖 3-2 所示。配合壓克力箱裝填現場土樣以砂箱式室內試驗來取代傳統性室內試驗，試驗時間估計約只需 3~4 週，比較傳統試驗不僅可大幅

減少試驗時間，亦可降低試驗設備與材料等成本支出。

本研究規劃土壤砂箱式室內試驗預計之試驗流程如下：

至試驗地挖取足夠試驗使用之土樣量，並將土樣填裝在客製化壓克力箱內(高 30 公分、長 24 公分、寬 15 公分)。為了能方便將土樣壓密夯實在填裝前會先烘乾 24 小時再進行填土壓密夯實，其中 TDR 水分感測器會預先埋入與現場同一深度之砂箱土樣內，後使該土壤達到水分飽和狀態並插入土壤水分張力計。並監測其土壤濕至乾之過程，測量期間以 60 分鐘為間隔監測，其土壤由濕到乾之試驗時間約 3~4 週，推估將獲取約 400 至 500 筆左右監測數據，足夠將後續研究利用美製軟體 RETC 來推求出土壤水分特性曲線。



圖 3-2 土壤水分張力計(左)與高感度精密 TDR 水分感測器(右)

第四節 土壤水分特性曲線擬合

於學甲試驗地獲取室外監測數據與土壤採樣之室內監測數據後，將利用美製軟體 RETC 擬合程式來推求出土壤水分特性曲線，並分析室內外試驗所獲致之土壤水分特性曲線的差異性，初步探討實務上以室內試驗數據取代現場試驗數據的可行性。

第五節 RETC 模式介紹

由於土壤水分特性如飽和水力傳導度 K_S 、非飽和水力量傳導度

等 $k(h)$ 和土壤水分特性曲線 $\theta(h)$ 等資料難以獲取，因此國內外的專家學者便開始研究如何利用較容易取得之土壤基本性質來預測很難直接測定之土壤水分特性的方法。由美國所開發之 RETC 套裝程式目前提供了非常快捷的土壤轉換公式功能。為了利用 RETC 套裝程式擬合出土壤水分特性曲線，在程式中需要土壤質地、土壤砂粒、粉粒和黏粒的百分含量以及假比重(總體密度)等土壤物理性質，因此可利用挖取回來的試驗地土樣進行土粒比重試驗、比重計試驗及篩分析等，完成土壤三相分布、粒徑分布後在程式中輸入各項數據值如圖 3-3 所示，便可使用該套裝程式進行土壤水分特性曲線之自動擬合而得到最佳之土壤水分特性曲線方程式。另外近來蓬勃發展的參數最佳化法，雖已廣泛被使用於曲線擬合上，但初期因缺乏各係數的搜尋範圍，因此相較之下初步採用 RETC 來進行，不失為一個便捷的方法。

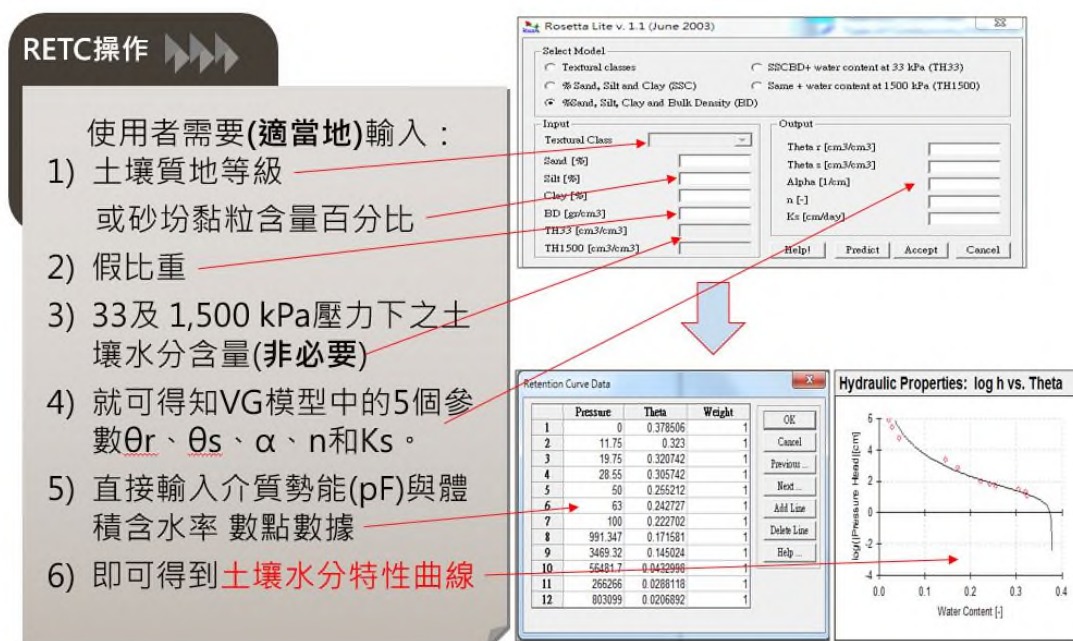


圖 3-3 RETC 介面操作圖

RETC 套裝程式所使用之 Van Genuchten 模型為 Van Genuchten 在 1980 年將其導出的水分特性曲線形式與 Mualem 模型相結合所得

出之特定解析形式，Van Genuchten 模型如下式所示：

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + (\alpha h)^{nm}} \quad (3.1)$$

其中

$\theta(h)$ ：土壤體積含水率 [L^3/L^3]；

h ：壓力水頭 [L]

θ_r ：殘餘體積含水量 [L^3/L^3]；

θ_s ：飽合體積含水量 [L^3/L^3]；

$\alpha[1/L]$ 與 n ：經驗擬合參數(或曲線性狀參數)； $m=1-1/n$ 。

第六節 研究分析評鑑指標

本研究中採用統計上常用的兩種指標，據以評定模式模擬之表現，表 3-1 為評鑑指標計算原則。

各指標中，判定係數(R^2)之值愈接近 1 時模式模擬表現愈佳；而效率係數(CE)愈接近 1 時則表示模式對於模擬資料與觀測資料之歷線密合度愈佳。

表 3-1 評鑑指標公式表

常用評鑑指標種類	評鑑指標方程式
判定係數 R^2 (coefficient of determination)	$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (w_{obs} - \bar{w}_{obs})(w_{sim} - \bar{w}_{sim})}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^N (w_{obs} - \bar{w}_{obs})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^N (w_{sim} - \bar{w}_{sim})^2 \right]}} \right]^2$
效率係數 CE (Coefficient of efficiency)	$CE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (w_{sim} - \bar{w}_{obs})^2}{\sum_{i=1}^N (w_{obs} - \bar{w}_{obs})^2}$

第四章 試驗地介紹與儀器架設

本研究以旱田灌溉現場作為監測對象，在與嘉南農田水利會進行試驗方法的評估並論及田區農作人員所能提供之協助事項的條件下，獲嘉南農田水利會首肯提供灌溉技術推廣中心農業灌溉試驗場之部分田區作為本研究之室外試驗地，並積極協助本研究劃定試驗區範圍、監測站位置等以及提供其他相關氣象與水文資料的監測數據等，以求完整取得旱作土壤水分數據與土壤物理性數據等，而有助於本研究的推動。

第一節 試驗地位置及環境介紹

學甲位於台南西北邊，位處北門地區境內，北臨臺灣省嘉義縣義竹鄉，東西長為 9.3817 公里，南北寬為 8.7190 公里，土地總面積約 53.99 平方公里，如圖 4-1 所示。



圖 4-1 台南學甲地區示意圖

灌溉技術推廣中心試驗業務主要於學甲農業灌溉試驗場進行，為

全國唯一之農業灌溉試驗場地，面積約 1.2 公頃，透過各項灌溉試驗設備進行水稻及早作各期別作物需水量、灌溉期距、灌溉方法及增產指數等相關基本資料收集及研究；業灌溉試驗場主要分為七大區，執行各項試驗業務。本研究之試驗田區設置於短期作物區中，位於東經 120.10 度，北緯 23.12 度，如下圖 4-2 所示，短期作物區種植作物如胡蘿蔔、蒜頭、胡麻等，本研究預計選定其一種植區作為試驗田區，田區灌溉系統為穿孔管灌溉，灌溉水源為地下水。



圖 4-2 業灌溉試驗場及試驗地區域圖

第二節 試驗地設備介紹

為了評比室內試驗取代現場試驗之可行性，因此需設置土壤水分資料觀測站以對後續進行土壤水分特性曲線之擬合分析。

學甲試驗地設置之土壤含水率觀測站屬自記式測站。土壤含水率觀測站基本架構由 TDR(時域反射)水分感測器、資料處理控制器、防潮箱、鉛蓄電池等與其他耗材所組成，其規格如表 4-1 觀測儀器設備規格功能列表、儀器設備外觀如圖 4-3 所示。

表 4-1 觀測儀器設備規格功能列表

名稱	規格	功能
TDR 土壤水分計	CSF11	量測土壤體積含水率
土壤水分張力計	SR Irrrometer	量測土壤基質勢能
雨量計	傾斗式雨量計	記錄降雨量
資料處理控制器 -1	WISE-4060/KAN-AE	處理、收集雨量測量之數據
資料處理控制器 -1	WISE-4010/LAN-AE	處理、收集 TDR 測量之數據
系統電源	12VDC 電池	供應儀器電源
太陽能板	SUN30M-12	將輻射熱轉為電能
太陽能板控制器	RBL-003	連接電池將電池充電
防潮箱-1	38cm*28cm*18cm	防止資料處理器等受潮損壞
防潮箱-2	27cm*27cm*18cm	防止電池受潮損壞







			
TDR 外觀	雨量計外觀	傾倒式雨量計內部	電池
			
資料處理器、太陽能板控制器		太陽能板	



圖 4-3 土壤含水率觀測站各項儀器示意圖

儀器使用說明如下：

一、TDR 水分感測器：

以現地監測土壤深度為例，將 1 支 TDR 水分感測器於地表下深度為 25cm 處以側插入之方式安裝，TDR 水分感測器所監測之數據將存於資料處理器之中，監測資料為電流值經由轉換最終將呈現土壤水分體積含水率%。

二、土壤水分張力計

於現場試驗，將 1 支土壤水分張力計以垂直隻方式插入與 TDR 水分感測器同一深度，並量測灌溉至退水之時段，配合資料處理器觀測數據，將監測到土壤基質勢能及體積含水率，進而推求得土壤水分特性曲線。

於室內試驗，將現地取樣之土壤填裝於訂製之壓克力砂箱內，水分土壤張力計將與 TDR 水分感測器一同插入在同一個深度，並先使土壤飽和後再放置陰乾，配合資料處理器觀測數據，將監測到土壤基質勢能及體積含水率，進而推求得土壤水分特性曲線。

在觀測期間，必須定期注意水分土壤張力計內部是否產生氣泡或缺水，如有缺水情況，則會導致資料不準確等情形發生，而加水方式由於壓力原理問題，必須以慢轉的方式打開上蓋，如有疏忽則會導致

儀器損壞。

三、資料處理控制器

利用筆記型電腦至資料處理器之官網下載套裝軟體，可用來資料處理及收集 TDR 水分感測器、雨量計等量測數據之用。

第三節 現場儀器架設

學甲試驗區觀測站儀器安裝設置流程如下：

- 一、將儀器埋設於作物正下方，在埋設點上挖掘一坑洞其深度約 60 公分，挖掘時以不破壞作物根系及影響作物為作業原則，如圖 4-4 所示。



圖 4-4 現場試驗地挖掘作業

- 二、根據林暉恩(2018)指出以 25 公分土層之含水率變化應可代表總土層平均含水率變化，因此將 TDR 水分感測器與土壤水分張力計於地表下深度 25 公分處橫向插入，土壤水分監測器埋設方式。



圖 4-5 學甲試驗地觀測站

三、儀器設置完畢後將土回填，為了使土況回復至原狀態於回填過程中除了注意儀器之外亦需夯實土壤以使土況一致，進而避免後續儀器觀測產生誤差。

四、設置觀測站：組裝雨量筒、太陽能板、資料處理控制器、防潮箱、鉛蓄電池與其他耗材等，資料處理控制器端連接 TDR 水分感測器與土壤水分張力計，觀測站設置完畢如圖 4-5 所示。

五、測量期間以 60 分鐘為間隔監測土壤體積含水率，方能以精度為一小時的情況下利於詳細觀測數據、除錯、分析及討論。

在儀器裝設完畢後，將定期(約 3 週一次)進行儀器設備的維護管理使儀器得以長期正常運作、收取監測數據。此外亦將與當地管理人員密切聯繫，克服維護儀器上之困難。

第五章 試驗結果與分析討論

第一節 試驗地土壤物理特性分析

由於試驗田區經年不斷翻耕土壤輪作不同作物，因此本研究將試驗地從地表到 60 公分深度視為均質土層，進行土壤之級配試驗(篩分析和比重計分析)，分析土壤質地類別與粒徑組成。土壤密度、土壤三相分布等土壤一般物理性質則使用金屬採土器所挖取之現地深度 30 公分之土樣來進行土壤物理特性試驗(比重瓶分析)，首先秤其濕土重後進行烘乾，在秤其乾土重獲得含水率及乾單位重，最後進行土粒比重試驗，再利用先前的含水率及乾單位重，以求出土壤密度、孔隙率、土壤三相分布等土壤一般物理性質。土層之土壤類別與粒徑組成等試驗結果如表 5-1 所示，土壤物理特性分析如表 5-2 所示。

表 5-1 土層之土壤類別與粒徑組成

學甲試驗地	砂粒(%)	粉粒(%)	黏粒(%)	土壤類別
0~60cm	34.0	40.0	26.0	壤土

表 5-2 土壤物理特性分析

試驗地	乾單位重 (g/cm^3)	土粒比重 (g/cm^3)	孔隙率 (%)	固相率(%)
30cm	1.76	2.62	39.8	60.2

第二節 TDR 水分感測器校正試驗

為了使 TDR 的量測值能代表實際的水分含量，本研究在進行實際記錄前會預先進行校正。將土樣填裝於容器內，填土過程中利用器具或徒手等方式壓實土壤，利用聯通管原理使土壤達到飽和，並在不同乾溼狀態下同時量取 TDR 監測值與土壤採樣，利用烘乾法求出採

樣之水分含量與 TDR 監測值比對，判定係數藉以推求出校正公式。試驗以 4 至 5 次取樣數據來求得校正曲線及校正公式，如圖 5-1 所示。TDR 監測值與採土法秤量值如表 5-3 所示。校正曲線及校正公式如圖 5-2 所示。由圖 5-2 中的 R^2 值可知 TDR 的監測值經校正後，足可代表真實的體積含水率。亦應 R^2 值逼近於 1，故實驗僅施作一次。



圖 5-1 校正試驗過程

表 5-3 採土法秤量值與 TDR 監測值紀錄

取樣號數 no.	1	2	3	4
TDR 監測值	0.7634	0.6722	0.5119	0.3459
採土法秤量 值	0.4095	0.2816	0.1472	0.0703

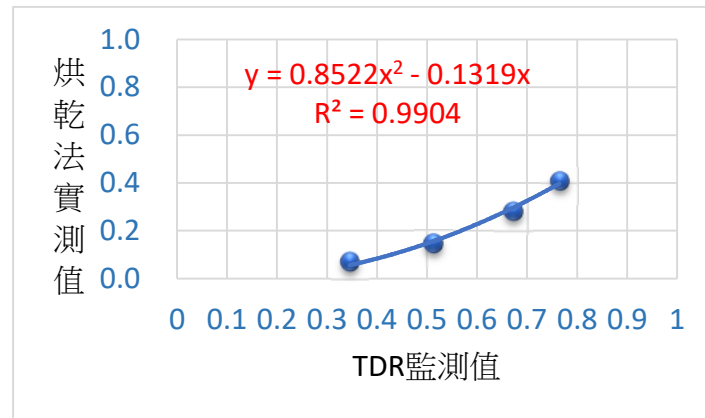


圖 5-2 TDR 體積含水率校正曲線與校正公式

第三節 室內土壤水分特性曲線試驗

本研究規劃一套土壤砂箱式室內試驗，試驗流程如下：

- 一、學甲試驗地現場挖取足夠進行土壤砂箱式室內試驗使用之土量。
- 二、試驗時會將土樣填裝在客製化壓克力箱內(高 30 公分、長 24 公分、寬 15 公分)進行砂箱試驗。其中為了使室內試驗之土壤狀況與室外試驗之現場一致，在砂箱填裝前會先將土樣烘乾 24 小時，以利將土樣如在試驗田現場所觀測到的土壤結構一般壓密夯實。
- 三、先將 TDR 水分感測器預先埋入與現場同一深度之砂箱土樣內，再將土樣填裝在壓克力箱內進行填土的壓密夯實。
- 四、在壓克力砂箱內填土壓密夯實之後，利用聯通管原理使該土壤達到水分飽和狀態並在同一深度位置(土表下 25 公分處)插入土壤水分張力計並與預埋之 TDR 水分感測器進行同步監測，室內試驗布置如圖 5-3 所示。
- 五、試驗過程中將進行土壤由濕到乾狀態下，體積含水率及土壤的基質勢能壓力的變動監測，測量期間以 60 分鐘為間隔，測試之土壤由濕到乾之試驗時間約需 3~4 週，獲取監測數據後將可供後續研究來求出土壤水分特性曲線。

六、待收集完並繪製土壤水分特性曲線後，於砂箱內土壤深度 25 公分處採樣，進行土粒比重試驗，藉此比對表 5-2，進而判斷室內實驗取代室外實驗之可行性。

七、將土樣進行土粒比重實驗，可獲得其土壤物理特性，接著與現地土樣之土壤物理特性進行比較，如表 5-4，得室內外實驗之土壤物理特性相近，可判斷出室內砂箱實驗夯實結果與現地相近。

表 5-4 室內外實驗之土壤物理特性相關數據

試驗地	假比重 (g/cm^3)	土粒比重 (g/cm^3)	孔隙率 (%)	固相率(%)
30cm	1.76	2.62	39.8	60.2
室內實驗 1	1.576	2.622	39.9	60.1
室內實驗 2	1.667	2.675	37.66	62.34

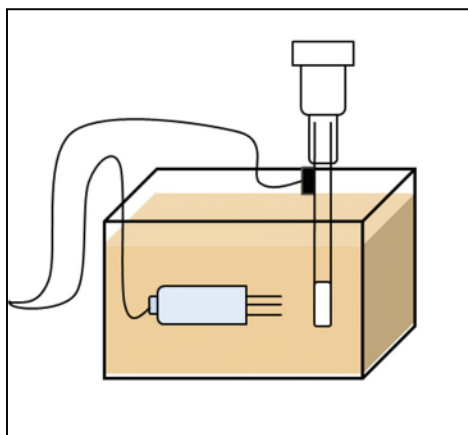


圖 5-3 土壤水分特性曲線之室內試驗配置圖

在探討其可行性時，挖取試驗砂箱中相對應深度的土樣進行土粒比重試驗，為求客觀性進行了兩次砂箱試驗，兩次土粒比重試驗，並與現地土樣之土壤物理特性作比較，得室內外實驗之土壤物理特性相近，可判斷出室內砂箱實驗夯實結果與現地相近。

土壤水分特性曲線之室內試驗所監測擷取之土壤體積含水率與

土壤介質勢能(pF)數據，配合本章第二節之土壤之級配試驗、土壤物理特性試驗所測得之土壤性質資料，一併輸入至美國製套裝軟體 RETC 擬合程式中，即可擬合出學甲試驗地之室內試驗土壤水分特性曲線。

第四節 現場與室內土壤水分特性曲線模擬結果

於現場與室內試驗利用 TDR 水分感測器與張力計埋設於相同深度之土層內，將量測之土壤含水率與 pF 值作為實測值展示，如圖 5-4 所示。除了搭配土壤水分量之極值理論點(最乾值及最濕值)輸入至 RETC 進行擬合外，其結果如圖 5-5、圖 5-6 所示，另外也進行未加入極值理論點的擬合，其結果如圖 5-7 所示。

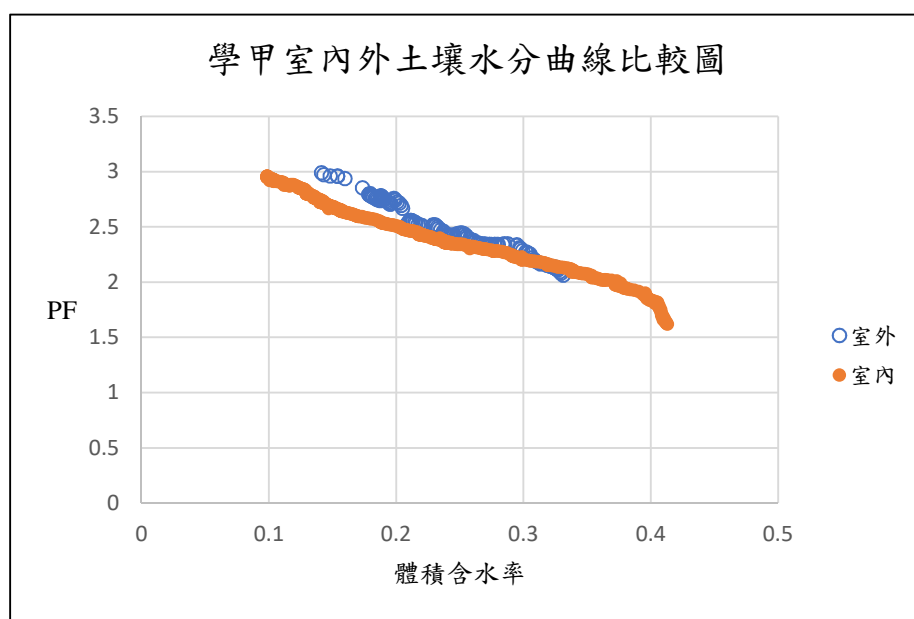


圖 5-4 學甲現場與室內土壤水分特性曲線實測值

由於現地農場較不易管理，常會因人為疏忽而使水分張力計因儀器內失水過多而導致監測數據失準，再者，在實務上也不允許出現過乾或是過濕的現象以免作物受害，所以室外實驗的整體數據皆在 pF 值 2 至 3 左右。反觀室內實驗雖可以人為控制各項因子而不會產生現地

實驗經常產生的疏失，但也因土壤水分張力計乾濕程度的量測極限約在 pF 值 1.5 至 3，以致無法製成較連續且完整的土壤水分曲線。

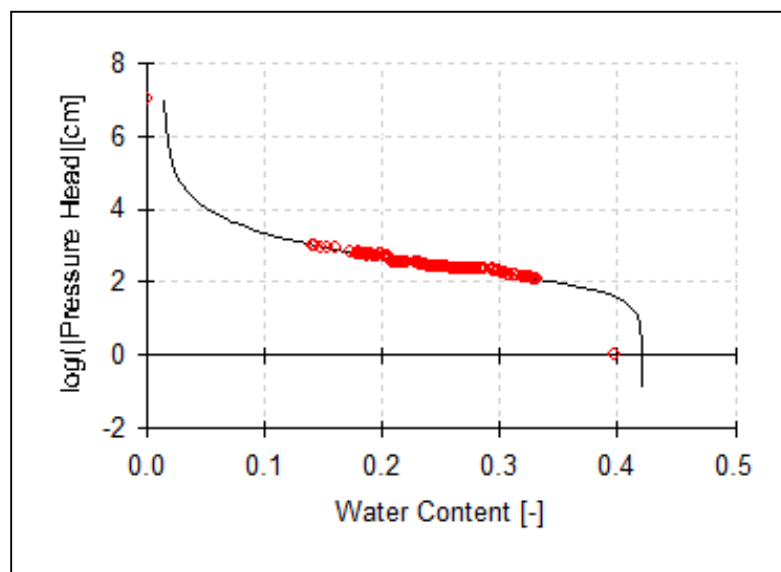


圖 5-5 RETC 模擬學甲地區之現場土壤水分特性曲線成果圖

表 5-5 RETC 模擬之現場試驗之收斂參數

參數	單位	RETC 參數
θ_r	cm^3/cm^3	0.013
θ_s	cm^3/cm^3	0.420
α	cm	0.009
n	無因次	1.531

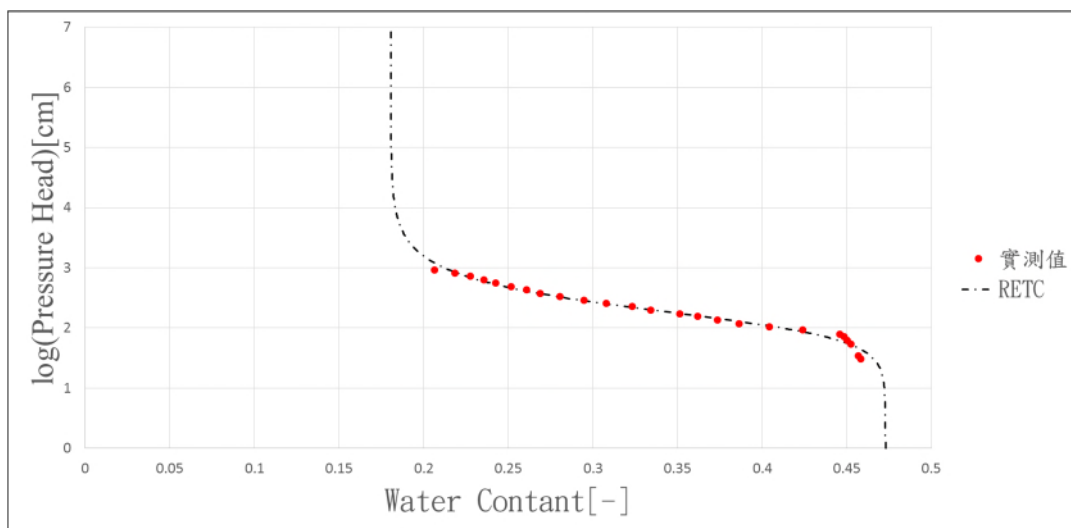


圖 5-6 RETC 模擬學甲地區室內試驗土壤水分特性曲線成果圖(未加入極值理論點)

表 5-6 RETC 模擬之室內試驗之收斂參數(未加入極值理論點)

參數	單位	RETC 參數
θ_r	cm^3/cm^3	0.1806
θ_s	cm^3/cm^3	0.473
α	cm	0.007
n	無因次	2.0903

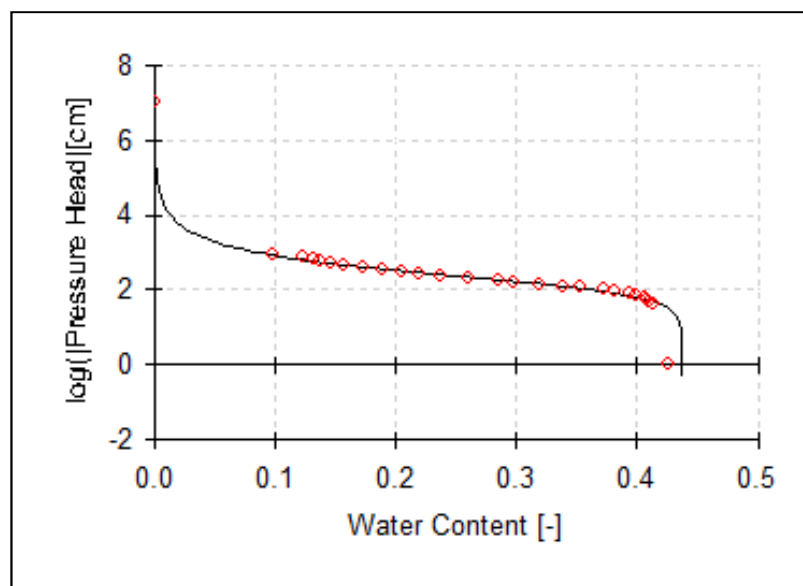


圖 5-7 RETC 模擬學甲地區室內試驗土壤水分特性曲線成果圖(加入極值理論點)

表 5-7 RETC 模擬之室內試驗之收斂參數(加入極值理論點)

參數	單位	RETC 參數
θ_r	cm^3/cm^3	0.008
θ_s	cm^3/cm^3	0.437
α	cm	0.007
n	無因次	1.877

在進行土壤水分特性曲線擬合時，可藉由土壤採樣試驗來設定極值理論點的最濕點以及設定極值理論點的最乾點來補充量測數據點的不足。當未加入極值理論點進行擬合時發現，土壤水分特性曲線在最乾點的位置除了與實測值有明顯差異外，其與有加入極值理論點之擬合曲線最乾點也有極大的差異，由此判斷，在進行土壤水分特性曲線擬合時，除了時測值點外，加入最乾與最濕之極值理論點來進行曲線的擬合，的確有其必要性。

第五節 現場與室內土壤水分特性曲線模擬結果分析

由 RETC 所模擬之現場與室內實驗結果，如僅探討實務上所需觀測田間含水量(pF 值 1.8)至生長受阻點(pF 值 3.0)，兩種試驗方法皆具有相當高的一致性，有利於實務上灌溉時機點之判斷。而以整體趨勢來觀察在相關係數 R^2 值及 CE 值有著良好的表現，如圖 5-8。

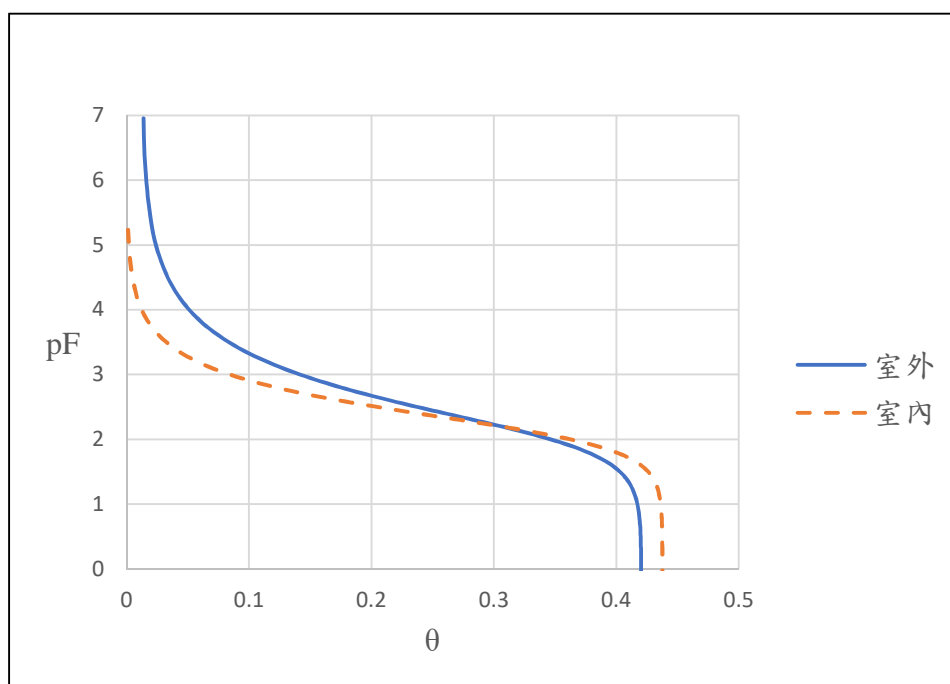


圖 5-8 學甲地區 RETC 模擬現場與室內實驗土壤水分特性曲線比較圖

表 5-8 土壤水分曲線之相關係數 R^2 值及 CE 值

	整體趨勢	pF(1.8~3 值)之相關程度
R^2 值	0.990	0.998
	修正前	修正後
CE 值	0.996	0.997

第六章 結論與建議

本研究利用 RETC 套裝軟體，分別擬合出土壤水分特性曲線方程式，並分析比較室內外試驗在土壤水分特性曲線上的差異性，以及利用土壤物理特性的相似程度進行比較，初步探討實務上以室內試驗數據取代現場試驗數據的可行性。其結論與建議分別如下：

第一節 結論

1. 本研究應用 TDR 水分感測器以即時監測土壤水分量變化，確實可解決傳統烘乾法需分時段取樣以及操作上的盲點與不便。與水分張力計搭配使用亦有助於 RETC 套裝軟體取得具連續性且完整的土壤水分特性曲線方程式。
2. 特性曲線擬合時，對於有無加入土壤水分量極值理論點進行擬合曲線之差異分析可知，若無加入極值理論點，在土壤最乾的位置出現明顯差異，因此判斷特性曲線擬合時加入極值理論點有其必要性。
3. 利用 RETC 軟體比對現場與室內實驗所得之土壤水分特性曲線方程式可知，若僅依照實務上之田間容水量(pF 值 1.8)至生長受阻點(pF 值 3.0)來看，其相關係數 R^2 值高達 0.998，兩者差異不大。因此判斷可以室內土壤水分特性曲線實驗來取代室外現場實驗，以避免室外實驗可能造成的觀測誤差。

第二節 建議

1. RETC 軟體在擬合土壤水分特性曲線時，除了 pF 與相應之土壤水分觀測值外，尚需輸入各項經由土壤物理試驗所取得之土壤物理

特性，頗為費時費力。因此如何透過目前已廣泛被利用之全域最佳參數探索法，僅利用 pF 與相應之土壤水分觀測值便可擬合出足夠精確度之土壤水分特性曲線，值得更進一步的研究與討論。

2. 本研究透過 RETC 軟體的介紹與應用，以快速且準確地取得土壤水分特性曲線方程式，藉此不僅能透過土壤體積含水量的觀測探討山坡地在開發前後有關土壤水分含量變遷的特性，更可進一步推估山坡地土壤水分入滲、滲漏等水分進入土壤後的移動過程與機制，亦有助於分析土壤水分動態模擬模式等的研發，進而有助於如何防止土壤沖蝕、如何防止坡地開發而引起之災害之探討，以及其對於抑制地表逕流及降低洪峰量的效益評估。

參考文獻

1. 陳威竹，2013，利用土壤粒徑分布模式推估土壤水分特性曲線之研究，國立中興大學水土保持學系碩士班碩士論文。
2. 林暉恩，2018，水筒模式於旱田土壤水分量模擬之應用研究，國立中興大學土木工程學系碩士班碩士論文，。
3. 大槻恭一，2016，「旱田灌溉技術士講習會 2016 資料」，九州大學演習林。(日文)
4. Topp, G. C., Davis, J. L. and A. P. Annan (1980) Electromagnetic determination of soil water content : measurements in coaxial transmission lines, Water Resource Research, 16, 574-582.
5. van Genuchten: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44, 892-898, 1980.

附錄

附錄一、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一、	本研究利用水分土壤張力計、TDR 水分感測器配合壓力箱裝填現場土壤已砂箱式室內試驗取代傳統室內試驗，可將原來 6-8 週的試驗時間減至 3-4 週，並降低試驗成本，研究目標明確，所設計流程原則可行。	感謝委員意見。
二、	為了使 TDR 的量測可代表實際土壤含水量，必須先校正介電常數，惟校正步驟尚須優化，其精準度也待評估。	感謝委員的意見。TDR 水分感測器於出廠時，其中介電常數皆已校正完畢。故此次研究計畫之校正試驗，本團隊以利用 TDR 量測當下之土壤體積含水率，而後再採集土壤樣本，利用烘乾法得知其當下真實體積含水率，進行比對校正。
三、	RETC 軟體所需之參數設定，如何搜尋到現場足夠數據以公正確設定，待釐清。	遵照辦理。有關 RETC 軟體所需參數設定等說明，將於期中報告中敘明。
四、	研究地點以嘉南農田水利會農業灌溉試驗場所轄試驗區為主，採樣範圍、數目、頻率需先確認。	遵照辦理。有關本案研究採樣範圍、數目等說明，將於期中報告中敘明。
五、	本案研究係要解決排水或灌溉問題，宜先界定清楚。	遵照辦理。有關本案研究係要解決排水或灌溉問題等，將於期中報告中敘明。
六、	遲滯現象為兩條曲線，灌溉時係由乾到濕的曲線，不宜簡化成一條曲線。	感謝委員的意見。本團隊採用其一土壤水分特性曲線因素為，實務上判斷灌溉時機時，通常是以土壤由濕至乾的狀態過程為主。因此本研究採用之土壤水分特性曲線，將以由濕至乾之曲線為主要分析對象。
七、	土壤水分張力計埋設理由及	感謝委員意見。有關與 TDR 搭配之必要

	其偵測範圍僅小於 0.75bar，宜有充分論述其與 TDR 搭配之必要性。	性等說明，將於期中報告中敘明。另外本團隊所使用之土壤水分張力計偵測範圍為 0 至 0.93bar。
八、	研究室之數據為重模土壤條件取得，其與野外資料如何串接建模利用，宜有清楚論述。	遵照辦理。有關重模土壤條件取得，其與野外資料如何串接建模等說明，將於期中報告中敘明。
九、	關鍵課題分析與對策論述不清楚，試驗方法量測與野外實地監測宜互相搭配，驗證其監測精度，不可分割。	感謝委員意見。試驗方法量測與野外實地監測等說明，將於期中報告加以清楚說明。
十、	最佳土壤水分特性曲線方程式，不宜以簡單或曲線完美加以評估，宜考量現地資料之實際反應，其精度宜列入評估。	感謝委員意見。待現場與室內觀測數據收集完畢後，將會考量現地資料之實際反應，其精度也會列入評估。
十一、	文中提到 pF 值，卻無針對此數值進行說明，建議對此數值之物理意義及其出處進行說明。	遵照辦理。有關 pF 值之物理意義及出處等說明，將於期中報告中敘明。
十二、	P11 中說明，量測期間預計以 60 分鐘為間隔進行，而非持續監測(不間斷)，建議說明以此時間長短進行量測之目的。	感謝委員意見。儀器在監測時是以連續不間斷的方式進行量測，唯有在擷取資料時是以 60 分鐘為間隔進行。如間隔時間過短，一因土壤水分變化太小，二因數據量過於龐大，在趨勢分析上似無其必要性；另如間隔時間過長，則與前述原因相反，恐不利於土壤水分特性曲線的模擬分析。基於以上考量，本研究以間隔 60 分鐘為基準進行量測。
十三、	目前計畫僅以 1 種土壤為主，建議可增加不同種土壤類型進行相同試驗方法之驗證，俾利此研究成果更具說服力。	感謝委員意見。在考量各種試驗所需時間後，本年度先以 1 種土壤來進行試驗並評估方法論的可行性，若往後有機會進行接續研究，將樂於嘗試不同種土壤類型進行完整的系列研究及驗證。
十四、	建議評估使用傳統的壓力鍋等試驗方法，進行 TDR 現地量測之 SWCC 驗證。	感謝委員意見。鑒於研究時程與研究議題設定，本年度的重點先放在曲線方程式的擬合研究及室內試驗的可信度探討。與傳統物理性試驗法之比較將留待往後之研究機會與議題設定為之。

十五、	P12 比重瓶分析似乎無法求出土壤密度、土壤三相分布等一般物理性質，請斟酌調整。	感謝委員意見。原文應以土粒比重試驗來表述，此處將於期中報告修正。
-----	--	----------------------------------

附錄二、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一、	土壤水分特性曲線存在著遲滯現象(hysteresis)吸水及退水之曲線路徑不同，計畫團隊僅採由濕至乾之曲線為分析對象，則只要用 curve fitting 即可取得土壤水分特性曲線方程式，為何需要用到 RETC 軟體？宜有說明。	謝謝委員意見。相關意見的修正請參照 P3-4。
二、	RETC 軟體擬合土壤水分特性曲線受到總體密度影響極大，團隊宜考量重模土壤與野外現地之差異，尤其是田間表土常有整地之干擾。	感謝委員意見。有關重模土壤與野外現地之差異，已透過兩者之固相率、孔隙率等土壤物理特性來說明其相似性。請參照 P5-3。
三、	實際土壤水分應視為實際值(秤重法)，TDR 應為監測值表 4-3 之說明有誤宜修正，且應有乾濕循環後之重複量測數據供參。	感謝委員意見。已修正圖 5-3 之統一稱呼。因為只施作一次濕到乾的測量，故無乾濕循環後之重複量測數據供參。
四、	圖 4-4 之實測值與試驗值之 Q(%)單位顯示有誤，其工作範圍不可能僅介於 0.76~0.35%，座標原點不宜列入樣類分析。	感謝委員意見。已修正座標單位。另為求回歸曲線合理化，已取消座標(0.0)為參考點，並加入截距分析之。
五、	建議以迴歸分析之判定係數為檢量線之指標，圖 4-4 宜有重複數、標準差之訊息供參； $R^2=1$ 不可能存在，宜檢核再修正。	感謝委員意見。因校正試驗各點僅作 1 次，故應無評估標準差之意義。判定係數以及重複數之相關修正。請參照 P5-2。
六、	宜附 RETC 成果供參，俾說明 RETC 軟體於本研究之加值應用。	感謝委員意見。RETC 軟體相關圖片已在 P5-6、P5-7 及 P5-8 呈現。
七、	期初審查意見「P12 比重瓶分	感謝委員意見。比重瓶分析應改為土粒

	析似乎無法求出土壤密度、土壤三相分布等一般物理性質，請斟酌調整」，本期報告 P1-3 及 P4-2 仍堅持做以上描述，請敘明撰寫理由及相關理論基礎。	比重試驗。另相關物理性試驗的內容已進行補充。請參照 P1-3、P5-1。
八、	請補充現地土壤取樣方法。	感謝委員意見。「使用金屬採土器所挖取之現地深度 30 公分之土樣」已於 P5-1 補充說明。請參照 P5-1。
九、	P4-4 請釐清土樣裝填在壓克力箱後是進行填土的壓密或夯實，另亦請補充壓密或夯實的標準為何。	感謝委員意見。土樣裝填後依照現場目視之土壤緊密度為參考進行填土的壓密。事後透過裝填土樣與現場土樣之固相率、孔隙率等土壤物理特性來說明其相似性。
十、	建議補充如何評估試驗土樣是否足以代表現地土壤。	感謝委員意見。有關重模土壤與野外現地之差異，將透過兩者之固相率、孔隙率等土壤物理特性來說明其相似性。
十一、	目前進度僅以室內試驗為主，其係使用重模土壤進行試驗，建議後續針對室內試驗之模型內土壤性質與現地試驗之土壤性質等進行比較及說明，並須注意室內試驗及現場試驗之情境需雷同，否則試驗恐有誤差。	感謝委員意見。有關重模土壤與野外現地之差異，將透過兩者之固相率、孔隙率等土壤物理特性來說明其相似性。
十二、	監測儀器(TDR 與張力計等)插入深度約為 25 公分左右，屬較淺層土壤，然現地崩塌之深度較深，後續若需應用在邊坡穩定之參數分析上，建議可先針對深度較深土壤進行試驗，以證明此方法於淺層或深層土壤皆有效。	感謝委員意見。

附錄三、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一、	RETC 所需要輸入之參數，是否可有參考值，或是必須進行現地試驗。	感謝委員意見。欲得到 RETC 程式中所使用之 VG 模型的初步參數，需輸入土壤質地、土壤砂粒、粉粒和黏粒的百分含量以及假比重等，故需進行室內之土壤物理試驗。另欲獲得準確之 VG 模型參數，則需進一步輸入 pF 與體積含水率的觀測數據，此等量測數據可透過現地或室內試驗取得。
二、	如無最乾及最濕的實驗值，有何代替方式。	感謝委員意見。如圖 5-6 所示，未加入最乾及最濕點，土壤水分特性曲線表現相當不佳。由於張力計有其 pF 值 1.5-3.0 的量測極限，因此解決方法之一可用理論最乾點(pF 7 時含水率為 0)以及理論最濕點(pF 0 時含水率為三相分布之氣相及液相的體積百分比)來替代之。
三、	極端性數值採建議性，可否有替代方案。	目前最快速的便宜性做法即是以理論最乾點及理論最濕點來替代之，或是加入風乾點(pF 5.5 時之含水率)來取代理論最乾點，由於各儀器的量測能力所限，尚無其他解決方案。
四、	研究取得之土壤試驗資料相當可貴，因此於結案時建議參考本局之數值資料標準格式提交檔案，並將實驗之結果一併繳回本局。	遵照辦理，已將各表格之格式進行修正。
五、	土壤水分特性曲線應用面相當廣泛，對於本局之業務實質應用面，請於建議部分提出說明。	遵照辦理，已加強對於水保局業務推動及應用面的建議說明。

行政院農業委員會水土保持局
與您一起打拼



行政院農業委員會水土保持局
54044南投市中興新村光華路6號
<http://www.swcb.gov.tw>