

壓力鍋排水試驗張力平衡時間之研究

林俐玲⁽¹⁾ 洪靖惠⁽²⁾ 蔡義誌⁽³⁾

摘要

壓力鍋排水試驗為傳統且常用之實驗，為量測土壤水分特性之方法，雖然需要較長的時間及繁複的實驗過程，但卻是最直接且實際測得方法之一，近年發展許多新的實驗儀器量測或間接以數值推估水分特性之方法，但排水試驗法之結果仍常用來作為驗證及討論的依據。本研究之目的為探討室內壓力鍋排水試驗，在不同時間開鍋之每個壓力勢能，所測得水分特性曲線之差異，探討一天和三天開鍋間距對土壤水分平衡的影響。本實驗分別施做 1/3bar、1bar、2bar、4bar、8bar、12bar 等壓力，測得其水分含量，進而求得水分特性曲線。研究結果顯示土壤因質地不同，會有不同的平衡時間。而以三天開鍋時間，繪出的水分特性曲線表現較一天的趨於平衡狀態。

（**關鍵字**：水分特性曲線、壓力鍋試驗、飽和水分含量、van Genuchten Model）

A Study of Equilibrium Timing for Draining in Pressureplate Experiment

Li-Ling Lin⁽¹⁾

Professor, Department of Soil and Water Conservation,
National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan, R.O.C.

Jing-Huay Hong⁽²⁾

Master, Department of Soil and Water Conservation,
National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan, R.O.C.

Yi-Zhih Tsai⁽³⁾

Doctoral graduate student, Department of Soil and Water Conservation,
National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan, R.O.C.

ABSTRACT

(1)國立中興大學水土保持學系教授

(2)國立中興大學水土保持學系碩士研究生

(3)國立中興大學水土保持學系博士研究生

Using pressureplate experiment to measure soil water properties is conventional and common, even if its measurement is expensive, time consuming, and labor intensive. However, it is the most directly measure method. Recently many new experimental apparatus and models in order to predict soil water properties were developed. But pressureplate experiment still is a familiar method used to test and verify the predicted results. The objective of this study was to compare the water characteristic curves measured by pressureplate experiment in different time, namely 1 day and 3 days. The water contents were measured at 1/3, 1, 2, 4, 8, 12bar for soil to obtain water characteristic curves. The result shows that soil water content could not achieve balance when measure in 1 day. The water characteristic curves in 3 days are better than 1 day.

(**Keywords:** Water characteristic curve, Pressureplate experiment, Saturated water content, van Genuchten Model)

前言

水文循環(hydrologic cycle)係為水在大氣與表面乃至地下之間循環變化之過程。而土壤在整個水循環的過程中扮演重要的角色。降雨落於地面上，一部分由於滲透作用使水分滲入土壤，另一部分於地表面移動、植物吸收或蒸發蒸散而損失。而進入地表面以下的土壤水分，在地下水位以下為飽和(saturated)，地下水位以上為未飽和(unsaturated)。未飽和土壤之水分移動過程均較複雜，很難加以定量描述。這是由於水在土壤的流動過程中，水分狀態及含量；包括土壤濕度、吸力及傳導度間的關係複雜(萬鑫森，1987)。至今有許多學者提出以間接的方式來模擬並預測土壤水分特性(Cornelis et al., 2001; Hwang and Powers, 2003)，但由於土壤吸附作用及孔隙幾何效應均太複雜，不容易以簡單的模式來說明。至今尚無滿意之理論間接預測基質勢能與濕度之關係。室內壓力排水實驗所得之土壤水分及勢能關係，是為較直接且準確之方法(Cassell and Klute, 1986)，所得的數據經常作為水分特性曲線發

展模式的依據。

低基質吸力(0~1bar)所保持的水分含量主要由毛細效應及孔隙分布所決定，所以受土壤構造之影響甚大。室內實驗在低基質吸力的量測方法常用如坩鍋法。高吸力範圍(1~15bar)的水份保存，受構造之影響較小，而受土壤質地及表面積之影響較大。實驗室在高基質吸力的量測方法有壓力鍋法(萬鑫森，1987)。室內壓力鍋排水試驗所測得為去水(desorption)曲線，即自飽和土樣逐漸施加壓力慢慢使土壤排水，同時連續測定濕度與吸力得到排水曲線。然而有學者認為壓力鍋實驗之土樣在每一壓力排水平衡時間的長短，與實驗土樣之厚度有關(Cassell and Klute, 1986)。

本研究之目的在探討室內壓力鍋實驗，土樣在三天及一天平衡時間的差異，瞭解是否因開鍋時間的長短，影響水分特性曲線之正確性。比較是否能以一天的時間使實驗的土樣達到平衡，而更快速得到勢能與水分含量關係之數據。其過程以 van Genuchten(1980)所提出之水分含量與基質勢能關係式來擬合水分特性曲線。van Genuchten(1980)推演的方

程式，即以 Mualem (1976) 提出之模式為延伸，將實驗參數帶入 Mualem (1976) 學者所提出的方程式，積分後得到新的函數，使應用更為方便。此外，van Genuchten(1980)在其所推演的模式中加入的兩個待定參數，使模式更具。有可變性，提高運用之靈活性。

研究材料與方法

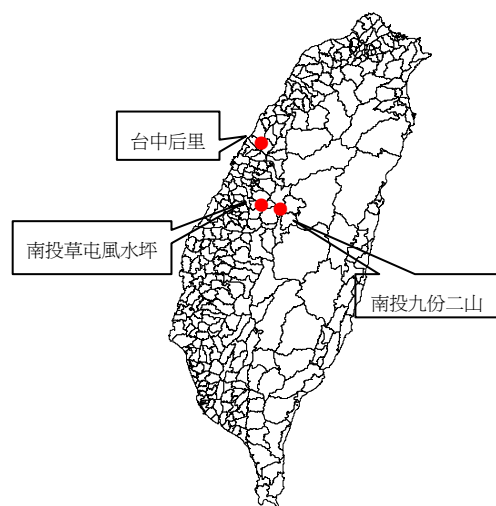


圖 1. 土壤採集點位

Figure 1. The location of soil sampling.

一、土壤採樣區概況

1. 採集地理位置及土壤概況

本試驗之土壤樣本採集台灣中部具代表性之紅壤、黃棕壤及黃壤。紅壤除土壤剖面顏色以紅色為主之特色外，其它之特徵包括質地細，粘度大，塑性高，土壤構造發達，排水性好，有效水分含量則較其它土類為少。黃棕壤表土多為灰黃棕色，呈酸性反應，

有機質含量低的土壤。黃壤分類屬弱育土、淋溶土，此乃母質經由弱度化育而生成之土壤，有時可因淋洗作用較強而使粘粒明顯往剖面下層移動，有部分養分(鉀、鈉、鈣、鎂)流失而呈黃、黃棕或紅棕色，且有明顯之土壤構造生成，多生成於丘陵地上之相對地形較安定、坡度起伏較緩和之處，土壤多呈酸性。

本實驗紅壤土樣採集地點為南投風水坪，地理位置為 N 2650490，E 221559，海拔高度為 201.2 公尺，平均坡度 18%，其質地分類為砂質壤土。黃棕壤採集自南投縣國姓鄉九份二山山區之土壤，地理位置為 N 2649504，E 234093，海拔高度為 614 公尺，平均坡度 3%，其質地分類為壤土。黃壤土樣採集自台中后里，地理位置為 N 2690675，E 221999，海拔高度為 200 公尺，平均坡度 1%，其質地分類為粘質壤土。

二、研究方法

本研究之研究流程及項目如圖 2 所示，各研究項目簡述如下：

1. 採集土樣之基本性質

由試區所採回之土樣經風乾後，過篩取粒徑 < 2mm 之土壤進行物理性質分析，包括水分係數、總體密度、顆粒密度、有機質含量、土壤質地分析。

- (1) 土壤總體密度：將金屬鐵環打入試區土壤中，後將金屬鐵環連土一起取出，切除兩邊多餘之土塊，使土壤體積等於金屬鐵環體積，利用絕緣膠布將兩端密封以防水分逸失。之後以烘箱 105°C 24 小時烘乾，計算其總體密度。
- (2) 土壤顆粒密度：土壤顆粒密度採比重瓶

法，可由土樣重量和土樣被取代之水體積換算求得。

- (3) 土壤有機質含量：有機質含量採用重鉻酸鉀氧化滴定法。
- (4) 土壤質地測定：採用吸管法（pipette sampling method）分別求出砂粒（sand）、粉粒（silt）及粘粒（clay）之重量百分比，再以質地三角圖（soil structure triangle）分類其質地。

2.室內壓力鍋排水試驗

本研究壓力鍋(ceramic plate extractor)系統裝置如圖 3.所示，依照欲實驗壓力的大小，選擇不同壓力承受範圍的壓力鍋(本研究中使用最大 15bar 之壓力鍋)以及空氣壓縮機(air compressor)，並用空氣濾淨器、氣筏開關及壓力錶連接。

本研究使用重填土樣(擾動土壤)進行實驗，茲將本文實驗步驟分述如下(林俐玲，1996)：

- (1) 實驗開始之前，將土壤分別以採樣現地的總體密度(砂質壤土 1.52gm/cm^3 ，壤土 1.38gm/cm^3 ，黏質壤土 1.45gm/cm^3)重填於壓克力環中，置於水中的多孔板上預濕，利用毛細原理，水分透過多孔瓷板上升使土樣均勻吸收水分達到飽和。
- (2) 15bar 多孔瓷板在實驗之前需先飽和，可將多孔瓷板置於水中浸泡 24 小時以上，或置於沸水中 30 分鐘加速瓷板內氣泡排除使達到飽和。將飽和之多孔瓷板放入壓力鍋中，連接壓力鍋中的排水管以利之後加壓時多於水分的排除。

- (3) 將飽和之土壤壓克力環放入壓力鍋中，放置時須注意壓克力底部之不織布完全貼合多孔瓷板，避免氣泡阻礙水分排除。放置完成後將壓力鍋之蓋子蓋上鎖緊，確保氣體不會於加壓時逸出。
- (4) 本實驗使用空氣壓縮機進行加壓，在空壓機進行運轉之前先關閉連接壓力鍋之進氣開關，打開空壓機鋼瓶之放氣開關，確定壓縮鋼瓶內有無殘餘高壓，確定沒有殘餘後，小心傾置空壓機，將其內餘水排出，以免鋼瓶生鏽。
- (5) 餘水排出後，關閉放氣開關，插上電源，啟動空壓機開關，空壓機便開始充氣加壓，旋轉氣筏開關以控制壓力大小，觀察壓力錶，待壓力達到所需壓力後，打開進氣開關使加壓空氣進入壓力鍋開始對土樣加壓，開始加壓後須注意壓力鍋有無漏氣現象。空壓機每隔固定時間會自動停止運轉使機器休息並自動運轉加壓。
- (6) 本實驗分別施做 1/3bar、1bar、2bar、4bar、8bar、12bar 等壓力並秤其每一壓力下之土樣重量。實驗完成後將土樣取出，置於 105°C 之烘箱烘乾 24 小時後秤重。
- (7) 實驗分別施做兩次，分別以每一個壓力開鍋時間間格為一天，及開鍋時間間格為三天。

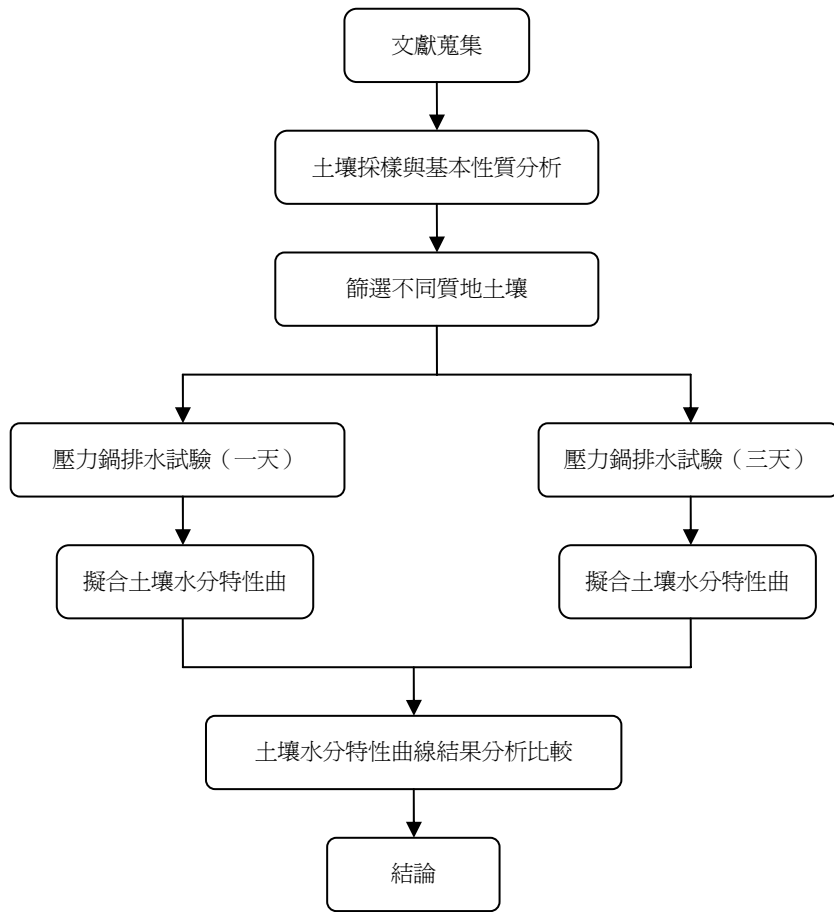


圖 2. 研究方法流程圖

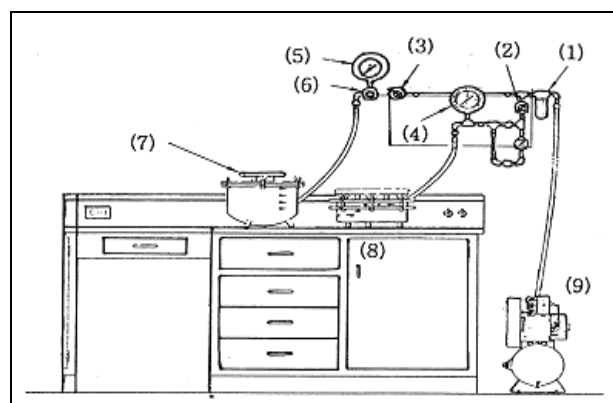
Figure2. Flow chart of the study method.

3.繪製水分特性曲線

計算各壓力下之體積水分含量後，將施加之壓力(bar)轉換成以水力頭高(cm H₂O)表示 (1bar=1033.6cm H₂O)，以水力頭為橫座標、體積水分含量為縱座標，便可繪圖得水分特性曲線。然後與van Genuchten(1980)的理論模式進行擬合，方程式表示如(1)式。

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_r - \theta_s} = \frac{1}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad (1)$$

θ_r 為土壤殘餘體積水分含量， θ_s 為飽和體積水分含量。 α 和 n 值為實驗所得之適當參數（ α 維度L⁻¹， n 為無因次）， $m = 1 - 1/n$ ($0 < m < 1$)。van Genuchten模式分別與三天及一天之實驗值進行擬合，可得不同之水分特性曲線。後續比較兩者之差異，探討壓力鍋平衡時間對水分特性曲線之影響。



- (1) 空氣濾淨器
- (2) 氣筏開關 1
- (3) 氣筏開關 2
- (4) 壓力錶 1
- (5) 壓力錶 2
- (6) 通氣開關
- (7) 5bar 壓力鍋
- (8) 15bar 壓力鍋
- (9) 空氣壓縮機

圖 3. 壓力鍋實驗裝置

Figure 3. The sketch of the pressureplate experiment

結果與討論

本研究的土壤樣本取三種不同質地，分別為砂質壤土、壤土、黏質壤土。其經分析後基本性質如表 1.所示。一般而言，在任何基質吸力下，粘粒含量越高則保水力會越強，

因此需要較長時間使土壤排水達到平衡。而在砂粒含量較多的土壤中，土壤顆粒間的孔隙較大，在某一特定吸力下，這些大孔隙內的水分會很快排空，因此在勢能較小的時候，較短的時間就能使土壤水分排出達到平衡。

表 1. 試驗區土壤物理性質

Table1. Soil properties of soil samples

採樣地點	總體密度 (g/cm ³)	顆粒密度 (g/cm ³)	有機質 含量 (%)	孔隙率 (%)	砂粒 (%)	粉粒 (%)	粘粒 (%)	質地
南投草屯 風水坪	1.52	2.67	1.35	43.07	67.01	31.27	1.72	砂質 壤土
南投九份 二山	1.38	2.47	4.42	44.13	45.75	40.08	14.17	壤土
台中后里	1.45	2.61	0.58	44.44	32.37	41.66	25.97	黏質 壤土

土壤構造影響到土壤水分特性曲線之形狀，尤其是在低基質吸力範圍，更顯得明顯。當土壤結構緊密時的時候，相對土壤之總孔隙度減小，特別是減少團粒間之大孔隙體積。另一方面，使土壤之大孔隙被擠壓成中等孔隙，中等孔隙增加，而團粒中的小孔徑仍保持不變，因此在高吸力範圍內之水分特性曲線，不同結構幾乎相同。本實驗土樣採用擾動土壤，其填土之土樣量以現地總體密度為依據。然而，一般在使用壓力鍋排水法取得水分特性曲線時，不加考慮填土之總體密度，因為水分保持主要機制為吸附性，而非毛細作用，因此水分保持能量受質地影響比受土壤構造影響較大(萬鑫森，1987)。

由表 3.可看到三種質地分別在三天及一天之不同張力下之土壤體積水分含量。當土壤樣本在張力為零時之水分含量為飽和水分含量，不同土樣之飽和體積水分含量，由孔隙率及填土時之總體密度換算而得(表 2.)。

表 2. 土壤飽和水分含量
Table 2. Soil Water of capacity

土壤	飽和體積水分含量(%)
砂質壤土	43.07
壤土	44.13
粘質壤土	44.44

表 3. 壓力鍋排水實驗數據

Table 3. result of ceramic plate extractor experiment.

張力 (cm H ₂ O)	砂質壤土		壤土		粘質壤土	
	體積水分含量(%)		體積水分含量(%)		體積水分含量(%)	
	三天	一天	三天	一天	三天	一天
344.5	35.38	44.19	36.55	51.59	39.84	48.69
1033.6	20.49	24.15	20.76	40.98	27.47	33.64
2067.2	6.03	20.10	9.29	37.54	15.53	30.40
4134.4	5.11	15.28	6.30	33.60	15.09	27.33
8268.8	4.51	13.79	5.81	31.96	14.20	25.50
12403.2	4.67	11.84	5.79	29.30	14.48	22.97

將擬合完成參數代回 vG Model，得到各土壤之方程式如下所示:

砂質壤土(三天)：

$$\theta = 0.0467 + \frac{0.3833}{\left[1 + (0.00181h)^{2.588}\right]^{0.614}}$$

(R²=0.9834)

砂質壤土(一天)：

$$\theta = 0.1184 + \frac{0.3116}{\left[1 + (0.00169h)^{1.645}\right]^{0.392}}$$

(R²=0.9570)

壤土(三天)：

$$\theta = 0.0579 + \frac{0.3834}{\left[1 + (0.00190h)^{2.612}\right]^{0.617}}$$

(R²=0.98656)

壤土(一天)：

$$\theta = 0.2930 + \frac{0.1483}{\left[1 + (0.000488h)^{1.285}\right]^{0.222}}$$

(R² = 0.8795)

黏質壤土(三天)

$$\theta = 0.1448 + \frac{0.2996}{\left[1 + (0.00227h)^{1.608}\right]^{0.378}}$$

(R² = 0.9599)

黏質壤土(一天)

$$\theta = 0.2297 + \frac{0.2147}{\left[1 + (0.00144h)^{1.297}\right]^{0.229}}$$

(R² = 0.9184)

表 3. 三種質地土壤 vG Model 參數

Table3. vG Model parameter of three textured soils.

土壤質地	vG Model α 參數(3 天)	vG Model α 參數(1 天)	vG Model n 參數(3 天)	vG Model n 參數(1 天)
砂質壤土	0.00180882	0.00169298	2.588089	1.645365
壤土	0.00189897	0.00048785	2.611594	1.285463
粘質壤土	0.00227149	0.00144173	1.608082	1.296567

三種不同質地土壤樣本，當壓力鍋平衡時間為一天時，在實測 344.533 cm H₂O張力下之水份含量比理論飽和水分含量來的高（圖 4、圖 5、圖 6），這顯示出實驗之飽和水分含量呈現過飽和的狀態，而一天的開鍋時間無法使土樣達到平衡，因此在低張力之下，水分含量有較高的值。砂質壤土（圖 4.）在排水過程中，水分迅速排出，在張力小的時候，曲線往下驟降使得轉折較明顯。雖然一天排水時間也有相同形狀表現，可是與三天排水時間比較，仍然在同一張力下之水分含量高出許多。粘質壤土和壤土保水力良好，以一天的排水時間土壤含水量與三天排

水時間更顯出較大的差異，因此，不管是在短時間內水便很快排出的砂質壤土或質地較細孔、細度小的壤土和粘質壤土，平衡時間都在三天之表現為佳。

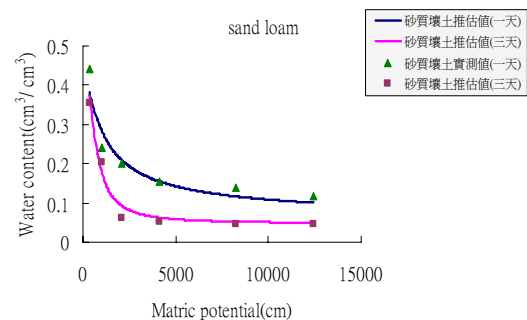


圖 4. 擬合砂質壤土水分特性曲線

Figure 4. Soil water characteristics curve of sandy loam

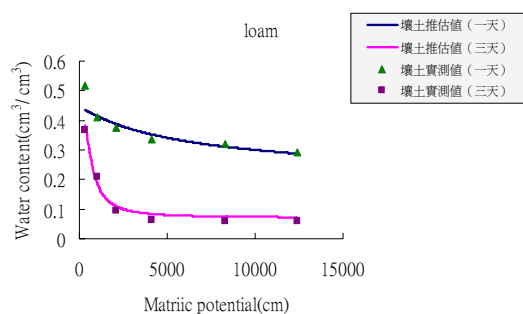


圖 5. 擬合壤土水分特性曲線

Fig. 5 Soil water characteristics curve of loam

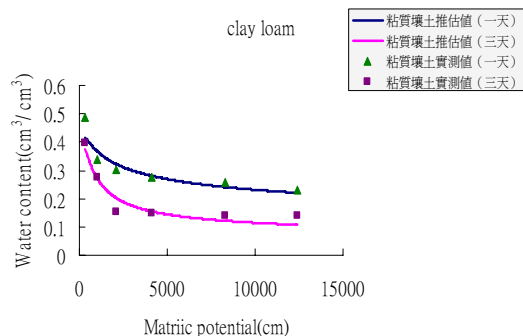


圖 6. 擬合粘質壤土水分特性曲線

Fig. 6 Soil water characteristics curve of clayey loam

為分析不同土壤質地一天與三天平衡時間之差異，本研究利用均方根誤差(root mean square error, RMSE)探討相同壓力勢能下兩個不同平衡時間水分含量之差異性，將實測數據以無偏估測值 1:1 line 畫法分別繪製如圖 7 至圖 9。且將兩者實測點以線性迴歸分析得到關係式，並計算判定係數(r^2)，檢定結果如表 4。

由檢定結果顯示，三種質地土壤在特定勢能下的水分含量，回歸分析結果皆達到 0.01 顯著水準。而比較三種不同質地土壤之均方根誤差，以壤土差異較大；砂質壤土差較小(表 4)。顯示土樣在壓力鍋內平衡的時間長短，與土壤質地有關。砂質壤土由於本身具有大

孔隙，在低張力時，水分便很快的排出(圖 4)。

表 4. 土壤水分含量判定係數與

均方根誤差檢定

Table 4. R^2 and RMSE of soil water capacity

土壤質地	r^2	RMSE
砂質壤土	0.9276**	0.0940
壤土	0.9388**	0.2386
粘質壤土	0.9238**	0.1077

**達 0.01 顯著水準

即使一天與三天平衡時間之水分含量差異相對壤土及粘質壤土小，均方根誤差分析判斷兩者不同平衡時間之水分含量，差異仍然顯著。而壤土比較一天與三天平衡時間之水分含量差異，相對於其他兩種質地均方根誤差大(表 4)。顯示壤土在一天內的平衡時間，土壤的水分尚未能夠完全排出使達到平衡狀態，直至一天後水分繼續排出，因此和三天之水分含量有明顯的差異(表 4)。

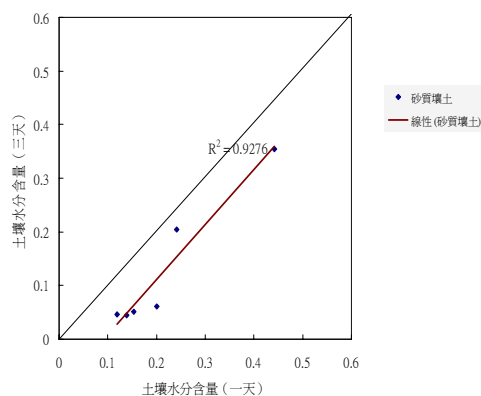


圖 7. 砂質壤土水分含量線性迴歸分析

Fig. 7 Linear regression analysis for sandy loam

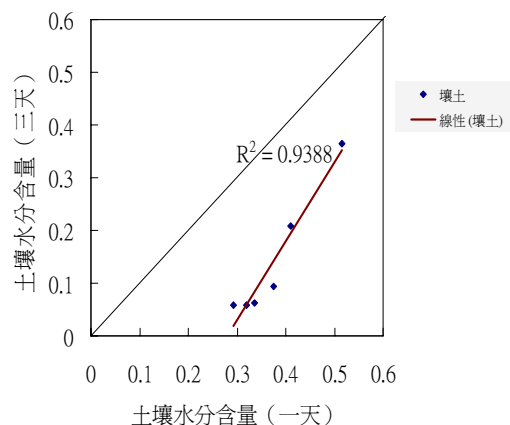


圖 8. 壤土水分含量線性迴歸分析

Fig. 8 Linear regression analysis for loam

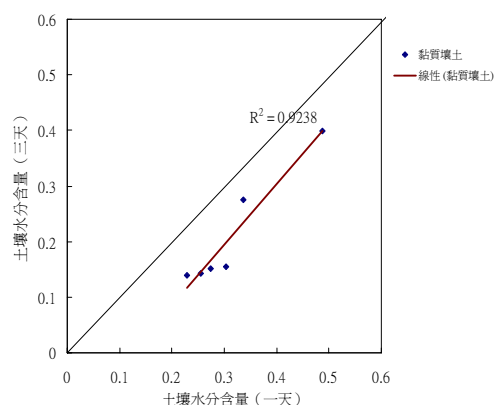


圖 9. 粘質壤土水分含量線性迴歸分析

Fig. 9. Linear regression analysis for clayey loam

結論與建議

由實驗結果看來，在室內做壓力鍋排水實驗，以三天的平衡時間較一天的平衡時間，繪出的水分特性曲線表現為佳。且不管是顆粒粒徑較大之粗顆粒土壤，或團粒穩定顆粒細小之土壤都有相同的結果。

在進行本研究時，忽略土壤之水分蒸發量於壓力鍋內受到的影響，排水時間較長而蒸發的水分含量是否對張力勢能與土壤含水量之關係，建議往後可對此進行深入考慮。而本研究假設土壤在勢能較高的時候，水分含量受土壤質地影響因素大於構造因素，因此忽略填土時的總體密度。然而，排水時在多少範圍之總體密度可忽略，尚未有定論，建議可對此項因子做評估討論。本實驗是以三種不同質地土壤，分別做不同填土樣本進行兩次的實驗，若能以同一土壤樣本，進行同一次試驗，使環境條件更為一致，將可提高實驗結果正確性。

參考文獻

1. 林俐玲、董小萍（1996）「土壤物理學實習手冊」「土壤物理學實習手冊」國立中興大學水土保持學系。
2. 張舒婷（2007），土壤水分特性曲線與不飽和水力傳導度之研究。國立中興大學水土保持學系碩士論文
3. 萬鑫森 譯（1987）「基礎土壤物理學」，國立編譯館主編，茂昌圖書有限公司發行。
4. Cassell, D.K., and A. Klute. 1986. Water potential : Laboratory Methods. P. 635-662. In A. Klute(ed.)Methods of soil analysis. Part 1 : Physical and mineralogical methods. 2nd ed. Agronomy Monograph no. 9.ASA and SSSA, Madison, WI, USA.
5. Cornelis, W. M., J. Ronsyn, M. Van Meirvenne, and R. Hartmann(2001), Evaluation of pedotransfer functions for predicting the soil moisture retention curve.

- Soil Sci. Soc Am. J. 65:638-648.
6. Hwang, S. I. and S. E. Powers(2003), Using Particle-Size Distribution Models to Estimate Soil Hydraulic Properties. Soil Sci. Soc. Am. J. 67:1103-1112.
7. Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res. d10:513-522.
8. van Genuchten, M. Th. (1980), A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. Soil Sci. Soc. Am. J.44:892-898.
-