



地下滴灌土壤水份之試驗研究

Experimental Investigation of Flow Pattern for Subsurface Drip Irrigation

逢甲大學土木及
水利工程研究所
博士候選人

劉建榮

Chien-Jung Liu

逢甲大學
水利工程學系
教授兼系主任

許少華*

Shaohua Marko Hsu

僑光技術學院
副教授

蔡存孝

Tswn-Syau Tsay

逢甲大學
水利工程研究所
碩士生

李孟霖

Meng-Lin Li

摘要

SDISDI 的方法指的是在地表或地下利用經常性的小流量灌溉方法，SDI 的優點包括：(1)機動施灌水量提高產量與品質；(2)經濟使用灌溉水，約可節省 25~50%；(3)減少鹽害防止土壤鹽化；(4)節省作物肥料及施肥勞力；(5)減少地下水污染問題；(6)以低流量施灌，對土壤之透水性能保持良好條件。由於水資源的重要性日益增加，在乾旱及半乾旱地區，SDI 可適時適量的提供作物需水量。本研究針對 SDI 中低水壓的地下灌溉(subsurface irrigation)進行砂箱試驗研究，研究目的在於了解地下水灌溉時水分進入土壤後分布的情形及土壤含水量隨時間的變化關係。本研究的試驗結果發現以試驗的各組而言，在 20.5ml/min 的入滲水量下，可涵蓋水平方向的入滲距離左右至少 10 公分，試驗所用的含水量計有一定的量測範圍，但本研究試驗之土壤含水量在含水量計可量測之範圍內。未來可以朝向降低入滲水量，以獲得更佳的结果。

關鍵詞：SDI，土壤含水量。

ABSTRACT

Using small, continuous discharge to irrigate on surface or subsurface is called Micro Irrigation. There were six advantages for using Micro Irrigation. First, variable discharge could get more quantity and quality. Second, Using water efficiently could retrench 25-50% quantity of water. Third, it could avoid soil to be salty. Forth, manure and labors could be reduced. Fifth, it could reduce sources to form groundwater contamination. Sixth, using low discharge to irrigate could keep well conductivity of soil.

*通訊作者，逢甲大學水利工程學系教授兼系主任，407 台中市西屯區文華路 100 號，shhsu@fcu.edu.tw

The significance of water resource was valued in the recent, especially on droughty region. In this study, low pressure for subsurface irrigation was simulated in a sand tank. The purpose was to know the variation and distribution of soil content with time when discharge flowed in.

Keywords : Micro Irrigation, Distribution.

一、前言

所謂「微量灌溉」(Micro Irrigation)泛指滴灌(drip irrigation)及噴霧灌溉(spray irrigation)而言(Haman and Izuno, 1989)。地下滴灌(Subsurface Drip Irrigation, SDI)屬於微量灌溉的方法之一，在理想的狀況下，SDI 所要達到的目的是直接供應作物成長的需水量給作物根系使用，如果經過適當的灌溉管理，土壤含水量可以保持在接近田間含水量的程度，作物在成長的過程中都能獲得適當的水分而成長。除此之外，微量灌溉也可以透過灌溉設施直接精確的提供作物所需之養分。在非乾旱地區的旱季(dry season)及乾旱及半乾旱地區(arid and semi-arid areas)，因為水量供應的不足或是不穩定，選定有效率的灌溉方法以節省水量的利用則為同時滿足節省水資源及供給作物需水量的必要措施。在應用 SDI 作為旱作灌溉方法時，如果灌溉水量不足，水分無法到達根系的深度或範圍，容易造成作物缺水而影響作物的成長；反之，如果灌溉過量，則造成水資源的浪費。因此，使用 SDI 必先了解水份入滲進入土壤的情形。

SDI 可以提供比噴灌更佳的土壤含水量均勻度(Distribution Uniformity)，且在灌溉的用水量上更可節省至 50% 之多(Harris, 2005)。依據現場實驗的結果，使用 SDI 可增加作物的產量 (Smith, *et al.*, 1991; Ayars *et al.*, 1998; Al-Omran, *et al.*, 2004)。其他使用 SDI 的優點包含可以增加肥料的使用效率、提高作物產量(Phene *et al.*, 1987; Smith *et al.*, 1991; Hutmacher *et al.*, 1996; Ayars *et al.*, 1998)、減少水份及肥料的深層滲漏(deep percolation)、減少水量的使用、提高灌溉效率(Phene, *et al.*, 1986; Ayars, *et al.*, 1999)……等。

砂箱(sand tank 或 sand box)是作為地下水實驗最佳的工具之一，由於砂箱可以直接模擬水在土壤中流動的情形，與實際地下水的流動狀況最為吻合，因此被廣泛應用於地下水流況及污染傳輸之相關研究與實驗。有關應用砂箱實驗的相關文獻不勝枚舉(Bear, 1972; Rashad *et al.*, 1991 and 1992; Peterson, *et al.*, 2000; Schmalz, *et al.*, 2002; Slater, *et al.*, 2002; 沈育資等, 2002)。為了解 SDI 水分進入土壤後的分佈情形及土壤含水量隨時間的變化關係，本研究以砂箱作為觀測 SDI 土壤含水量變化的工具。由於砂箱可以提供良好的控制條件，如水量控制、邊界條件、土壤特性...等，並可減少不確定因素(如土壤的非均質特性)對於觀測土壤含水量變化的影響。因此，砂箱為研究觀測 SDI 土壤含水量變化的良好工具。

二、砂箱試驗

2.1 試驗設備

本試驗所採用之試驗砂箱長 150 公分，高 70 公分，寬 10.0 公分，如圖 1 所示。模擬 SDI 之灌溉水量由蠕動式抽水馬達(peristaltic pump)控制，蠕動式抽水馬達可以精確的控制流入土壤中的灌溉水量，並配合含水量計在進行 SDI 附近量測各位置土壤含水量隨時間的變化。

2.2 渥太華砂

為清楚觀察水流於土體中滲流之濕鋒，且避免因土壤粒徑過大造成水流流速太快而不易觀察，故選用型號為 C190，中值粒徑 D_{50} 為 0.35mm，均勻係數為 1.8 的白色渥太華砂進行砂箱實驗。圖 2 為本研究所用渥太華砂之土壤水理特性曲線，試驗數據乃經交大壓力鍋試驗所得，透過劉(2001)以數值模擬結果分析修正後得到與

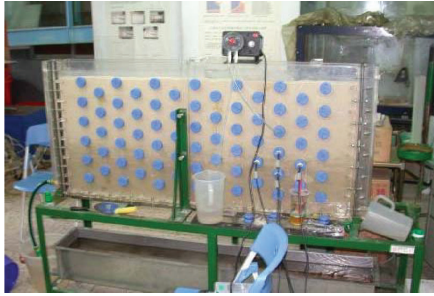


圖 1 砂箱正視圖

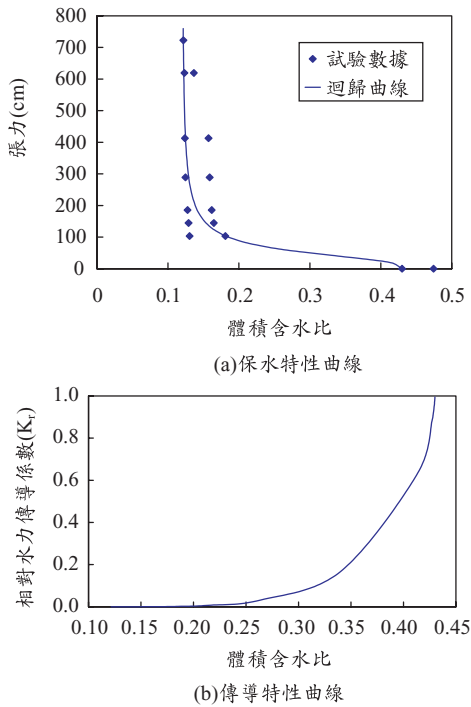


圖 2 渥太華砂土壤土壤水理特性曲線

試驗結果較接近之渥太華砂土壤保水特性曲線與傳導特性曲線。其中體積含水比為單位體積所含之水體積，單位為 L^3/L^3 ，以下簡稱為含水量。張力部分為土壤受壓排水時，土壤孔隙間水分子所產生之抵抗張力，單位為 L 。飽和土壤水力傳導係數(saturated hydraulic conductivity)為 0.048cm/sec 。

表 1 為渥太華砂與於台東所取之現地土壤(接近砂壤土)的 van Genuchten 特性曲線參數比較。由劉(2001)之研究可知， α 為土壤保水曲線

表 1 渥太華砂與現地土壤之特性參數比較

土壤種類	θ_r	θ_s	α	β	K_s (cm/sec)
渥太華砂	0.12	0.43	0.022	2.9	0.048
現地土壤	0.3	0.42	0.00976	1.29	0.01

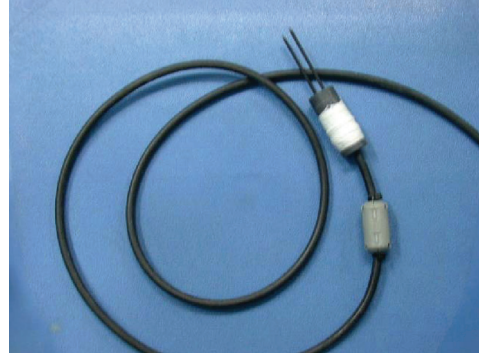


圖 3 含水量計探針圖

參數，為空氣灌入張力(ψ_a)之倒數(即 $\alpha = \frac{1}{\psi_a}$)，空氣灌入張力為土壤受壓達某一壓力時，土壤中的水分會開始大幅減小，即空氣要灌入土壤所需克服的張力。 α 愈小，代表空氣灌入張力愈大，即代表需較大的壓力才能使土壤水分流失，即表示土壤保水能力愈強。由表 1 可知，渥太華砂的保水能力較現地砂壤土低，且透水性較好。

2.3 含水量計率定試驗

本試驗所用之含水量計，其理論量測範圍為 $0\% \sim 100\%$ 之含水量，但本次實際量測所得之最高含水量值約為 40% 。含水量計測土壤含水量的原理是利用前端兩支長 5.0 公分相距 1.4 公分之探針通電後激發出電子流，經由土體中含水量的差異形成不同的電位差，藉由電阻大小的不同來分析判讀含水量的大小(如圖 3 所示)。使用含水量計進行量測前，須對含水量計進行率定試驗，本研究共使用 4 支含水量計，各含水量計測之數據與實際數據進行迴歸後，可得各含水量計讀數與土壤實際含水量之迴歸公式如圖 4~圖 7 所示。

未飽和體積含水比 θ_v 可由(1)式求得：

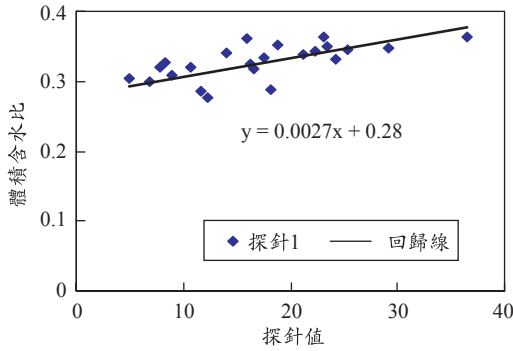


圖 4 探針 1 之未飽和線性迴歸線

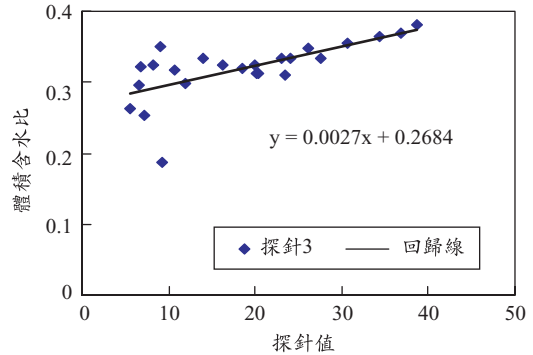


圖 6 探針 3 之未飽和線性迴歸線

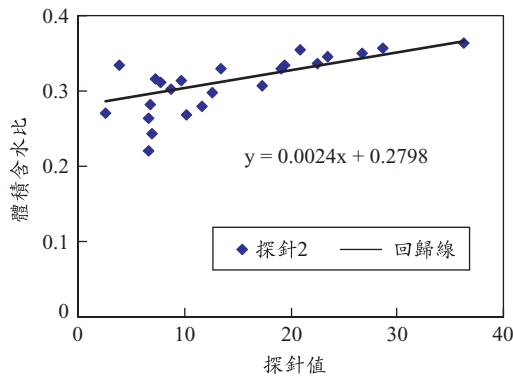


圖 5 探針 2 之未飽和線性迴歸線

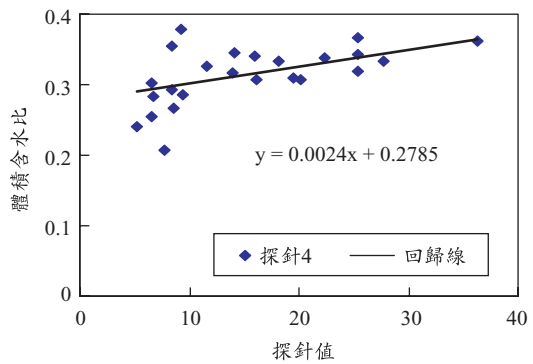


圖 7 探針 4 之未飽和線性迴歸線

$$\theta_v = \frac{\frac{w_w}{\gamma_w}}{\frac{w_s + w_w}{\gamma_s + \gamma_w}} \dots\dots\dots(1)$$

其中： w_w 為水的重量； γ_w 為水的密度； w_s 為砂的重量； γ_s 為砂的密度。

2.4 砂箱 SDI 入滲試驗

2.4.1 蠕動馬達加壓式微量灌溉

本試驗主要的目的之一為觀察以蠕動式馬達將定量水流注入土體，水流滲入土體後所產生的濕鋒隨時間移動情況，並以含水量計量測固定位置之土體含水量於灌溉過程中的變化歷程。假設砂箱內的渥太華砂壓密分布均勻，注入水流的擴散情況應呈現左右對稱的現象。試驗步驟如下：

1. 首先將渥太華砂放入烘箱中以 125°C 的高溫烘烤 24 小時，使所用渥太華砂的初始狀況皆為乾燥之狀態，取出後再以細網過篩將雜質除去。
2. 將渥太華砂分多次慢慢填入砂箱中，於填入過程中在砂箱中加水，使水高度高出所填的砂高度約 10 公分。填入過程需不斷用棍子攪拌砂子以排出空氣使渥太華砂呈均勻分佈，不可過於重壓造成土體局部壓密。
3. 將渥太華砂填到所需高度後再將水排出，並從砂的上方給予均勻的搗實，使各部位均勻的壓密讓空隙更加減少。
4. 將四支含水量計裝設於欲觀察之位置，並將水注滿至超過土體高度約 5 公分以確保渥太華砂為飽和狀態。開啓含水量計開始量測，並開始由砂箱兩端的出水口排水(圖

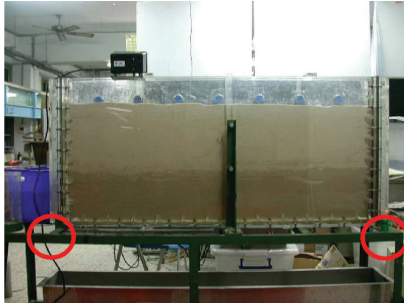


圖 8 渥太華砂排水達穩定之情況



圖 9 蠕動式馬達灌溉示意圖

8 中的紅色圓圈處)，砂箱底部為不透水之壓克力板。

5. 當四支含水量計的數值因排水而使土壤含水量減小至趨於定值時，砂箱中仍會有部分水分無法以重力方式排除(如圖 8 所示)。
6. 啟動蠕動式抽水馬達(如圖 9 所示)以不同的固定水量進行 SDI 試驗，同時維持砂箱兩端出水口為排水的狀態並進行土壤含水量量測。
7. 待含水量計讀數因灌溉上升至一定值不隨時間改變時即停止量測(代表含水量計量測位置之灌溉水量與流失量已達平衡狀態)。
8. 重複步驟 1~步驟 7，分別以其他三組不同量測位置的組合重複進行因灌溉水量不同而產生的土壤含水量變化，量測位置組合如圖 10~圖 12 所示。

2.4.2 定水頭微量灌溉

除了觀察以蠕動馬達進行加壓式灌溉所造成的濕鋒移動情況與含水量變化外，另以固定壓力水頭差進行之微量灌溉試驗，除了觀察水流滲

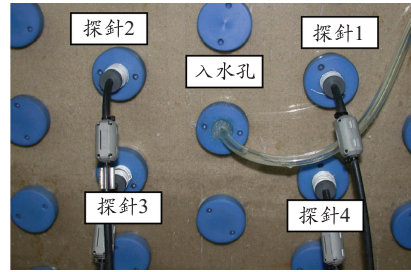


圖 10 含水量計量測位置組合一

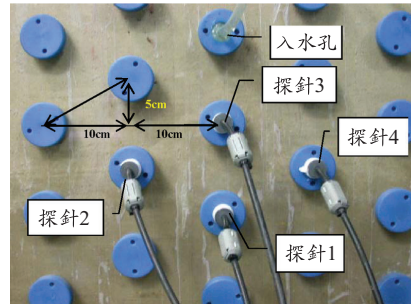


圖 11 含水量計量測位置組合二

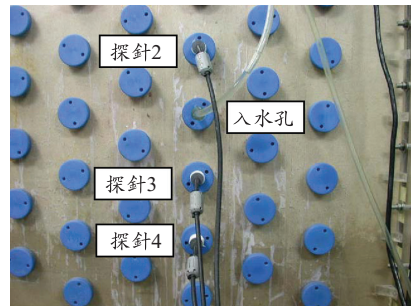


圖 12 含水量計量測位置組合三

入土體後濕鋒移動情況外，並以含水量計量測土體含水量於水流滲漏過程中之變化歷線。此外並探討連接入水口的水管初始條件為充滿水或沒有充滿水兩種注入方式所產生的差異。試驗步驟如下：

1. 設定並固定補注水源的水位高，以補注水源的固定水頭與砂箱入口口的壓力差為驅動力進行灌溉。
2. 將連接到入水孔的水管分別以充滿水與空管的情況進行實驗。
3. 試驗過程以含水量計記錄土壤含水量隨時

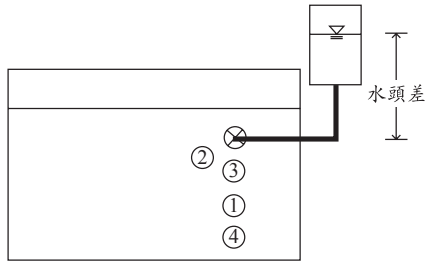


圖 13 定水頭微量灌溉試驗設計示意圖

間的變化。當四支含水量計數值不隨時間改變時，代表土壤的含水量已經接近穩定狀態。

4. 調整補注水源的水位面距入口的高度使水頭差分別為 58、53、48、29 及 24 公分(如圖 13 所示)，並重複步驟 1~3 進行量測。

三、試驗結果與討論

砂箱 SDI 試驗可分為兩個部分進行探討，第一個部分為排水過程，另一個部分為 SDI 灌溉過程。排水試驗的目的是作為 SDI 灌溉試驗的先期試驗，為了解在 SDI 過程中渥太華砂的含水量變化參考依據；SDI 灌溉的目的則是了解在各種不同的灌溉水量條件下，水流入滲後的移動情形及含水量變化。

3.1 排水試驗

含水量計在量測蒐集資料上為每 30 秒激發一次取得資料。由圖 14~圖 16 可知，土壤從飽和的狀況下開始，經過約一小時的排水，含水量漸趨於一個穩定的數值約介於 0.28 至 0.31 之間。

在三種量測位置組合中，起始的土壤含水量約介於 0.33 至 0.36 之間，較渥太華砂的飽和含水量 0.365 ~ 0.375 略低，可能是因為在砂箱填砂過程中仍然有些空氣被滯留(trapped)在土壤孔隙中，故使開始排水時之土壤飽和含水量略低於飽和含水量(少約 3%)。

在量測位置組合一的情形下，所有探針經過一個小時的排水，數值皆迅速下降(如圖 14 所示)。量測位置組合二的情形下(圖 15)，探針 2、3、4 經過一個小時的排水，數值迅速下降，惟探

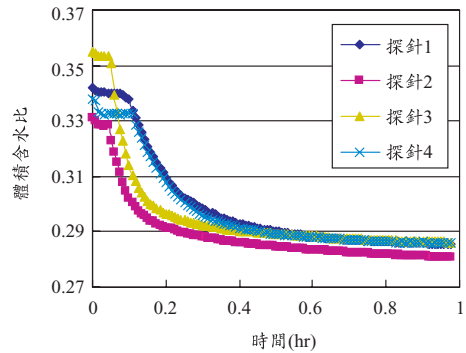


圖 14 量測位置組合一排水時含水量之變化

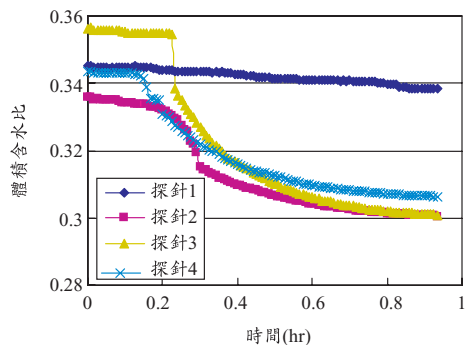


圖 15 量測位置組合二排水時含水量之變化

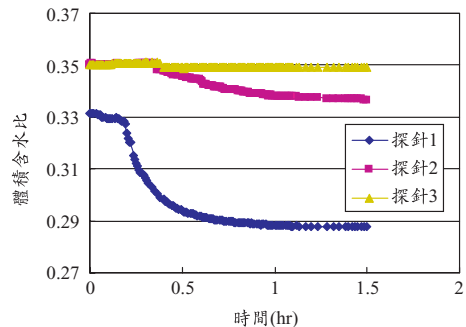


圖 16 量測位置組合三排水時含水量之變化

針 1 在量測的時間內，數值皆維持在 0.34 左右，下降幅度極緩，可能是探針 1 較接近砂箱底部，雖然經過長時間的排水，仍然無法使探針 1 附近的土壤排水至與探針 2、探針 3 及探針 4 的土壤一樣乾燥。經一段時間排水後，由砂箱的外部觀察(圖 8)，探針 1 所在位置之土壤仍較濕潤且呈現較深的顏色，此乃因其量測位置較低，毛細張

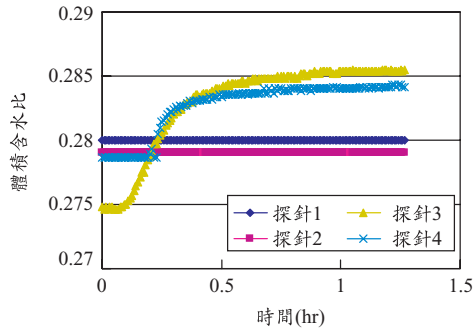


圖 17 量測位置組合一灌溉水量 41.7 ml/min 之含水量變化圖

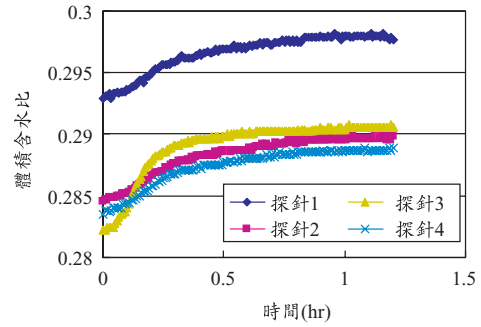


圖 19 量測位置組合二灌溉水量 20.5 ml/min 之含水量變化圖

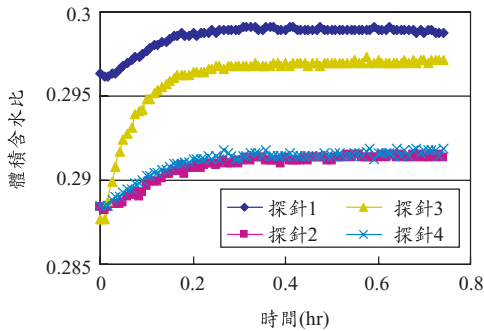


圖 18 量測位置組合二灌溉水量 41.7 ml/min 之含水量變化圖

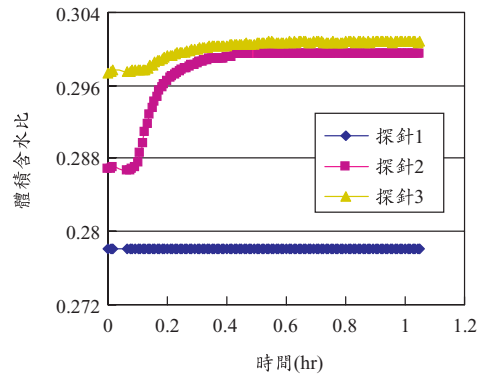


圖 20 量測位置組合三灌溉水量 41.7 ml/min 之含水量變化圖

力的作用使其需要較長的時間才能將水分排除。量測位置組合三的情形下(圖 16)，探針 2 經過一個小時的排水，數值迅速下降。探針 3 位置較低故其下降幅度較小。而探針 4 在量測的時間內數值幾乎維持在 0.35，與組合二之探針 2 情況相同。

3.2 蠕動馬達加壓式微量灌溉

圖 17~圖 20 分別為微量滴灌量測位置三個組合各探針的土壤含水量隨時間變化圖。從圖 17 可以發現，組合一中的探針 1 及探針 2 所在位置皆高於入水孔，於進行 SDI 的過程中，灌溉水量不足以向上擴散影響到此兩支探針，故其含水量維持固定。但探針 3 與探針 4 皆低於入水孔，與入水孔的距離及裝設高度皆一樣，故其含水量隨灌溉水量增加之變化情況極為接近。

圖 18 與圖 19 分別為量測位置組合二之 SDI 於不同灌溉水量下各含水量計的變化情況。由圖 18 與圖 19 可知，探針 3 因距入水口較近，故灌溉水量增加對其含水量變化有較大的影響。相對的，探針 1、探針 2 與探針 4 距入水孔較遠，故灌溉水量增加對其含水量之影響較小。但可發現灌溉水量較大時，其土壤含水量上升幅度也較大，所達之穩定平衡含水量也較高。

圖 20 量測位置組合三中探針 2 的位置高於入水口，故其現象與量測位置組合一中高於孔口的探針 1 樣不受灌溉水量影響，故其探針值不變。探針 3 因距入水口較近，故其含水量受灌溉水量影響而上升的幅度較探針 4 大。

表 2 及表 3 分別為量測位置組合二灌溉水量 41.7 ml/min 及灌溉水量 20.5 ml/min 各探針量測值達最後穩定值及所需要的時間。可發現灌溉水

表 2 量測位置組合二灌溉水量 41.7 ml/min 各探針含水量量測值最後穩定值及所需時間

	量測含水量值達到穩定所需時間 (小時)	最後量測含水量值
探針 1	0.16	0.298
探針 2	0.25	0.291
探針 3	0.25	0.297
探針 4	0.18	0.291

量為 20.5 ml/min 為 41.7 ml/min 的一半時，入水孔下方處的土壤最後仍可達到與灌溉水量 41.7 ml/min 相同的含水量，但探針 1、探針 2 與探針 3 所需時間約為 2 倍，探針 4 約需 2.5 倍。且僅需灌溉水量 20.5 ml/min 即可涵蓋左右水平方向的入滲距離至少 10 公分。

3.3 定水頭微量灌溉

定水頭原理是採用重力進水的方式，當開始注水時，由於砂箱內的土壤經過排水較為乾燥的關係，所以水力傳導係數 K 值較大，流進的水量也較大。但隨著入流口附近渥太華砂含水量的增加，其水力傳導係數隨之減小，使得入流量漸小趨近於穩定，最終土壤含水量也趨近一穩定值。待其含水量趨於穩定值後停止補注，觀察其土壤排水過程之含水量變化(如圖 21~圖 26 所示)。由圖 21~圖 26 不同水頭差補注條件下之含水量變化可知，補注一開始水管若為空管，則開始補注時會有一突然的水壓將空管內的空氣連同補注的水流一起擠壓進入乾燥的土壤，對於入水口附近的影響較初始條件為滿管略大。由探針 2 的讀數可明顯發現，初始條件為滿管之情況時，即使補注水頭高度提升至 58cm，其入滲水流向兩旁擴散的影響範圍皆無法達到探針 2 的位置即向下滲流。此外，不論初始條件為空管或滿管，當補注水源的水頭提高至 58cm 時，入流口附近的土壤含水量於一開始皆會有一明顯的突增現象。

四、結論與建議

1. 在各組的試驗觀察現象中可以發現，在 SDI 時間一小時內，所有探針顯示的土壤含水量均呈上昇並趨緩至穩定值。就使用的渥

表 3 量測位置組合二灌溉水量 20.5 ml/min 各探針含水量量測值最後穩定值及所需時間

	量測含水量值達到穩定所需時間 (小時)	最後量測含水量值
探針 1	0.32	0.298
探針 2	0.47	0.292
探針 3	0.48	0.293
探針 4	0.45	0.290

太華砂而言，飽和的土壤水力傳導係數 (hydraulic conductivity) 約為 0.048 cm/sec，在渥太華飽和的狀況下，水分傳輸一個小時移動的距離約為 172 公分，而所有量測點距離入水孔僅為 10 公分~30 公分，所以量測的數據應屬合理範圍內。

2. 由高於入水口的探針值可知，灌溉水量因受重力影響大部分皆向下滲流，故於設計 SDI 裝置時應將其列入考慮。
3. 由各量測組合探針值可發現，於灌溉情況下，越接近入水口的土壤含水量變化越大，且越接近飽和含水量。
4. 在 SDI 設計上，由砂箱試驗量測位置組合二的結果可知，渥太華砂在 20.5 ml/min 的入滲水量下，可涵蓋左右水平方向的入滲距離至少達 10 公分。
5. 由砂箱試驗量測位置組合二的結果可知，渥太華砂於灌溉水量為 20.5 ml/min 約為灌溉水量 41.7 ml/min 的一半時，其含水量達到穩定所需的時間約需灌溉水量 41.7 ml/min 的 2 倍。
6. 於定水頭補注條件下，初始條件為空管時，入水流對於入水口附近的影響範圍較初始條件為滿管略大。
7. 不論初始條件為空管或滿管，當補注水源的水頭提高至 58cm 時，入流口附近的土壤含水量於一開始會有一明顯的突增現象。
8. 本研究未來可朝向以更低的灌溉補注量進行量測，或使用更多組的探針量測實際灌溉後的入滲涵蓋範圍；另亦需利用更細質地的土壤或耕作的現地的土壤作為試驗的土壤進行比較。

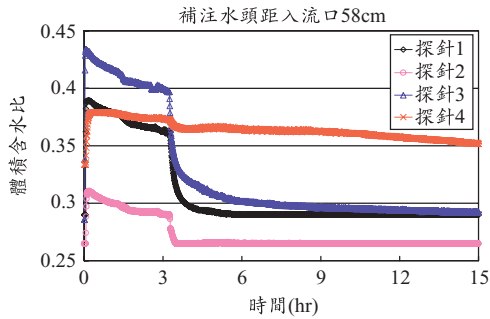


圖 21 定水頭補注初始空管之土壤含水量變化(補注水頭高 58cm)

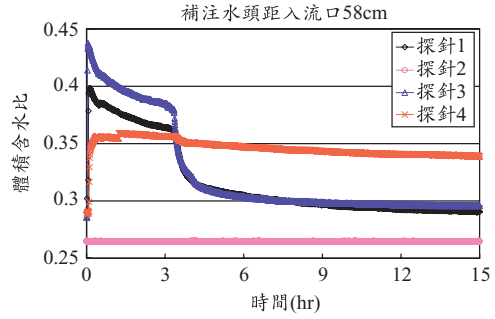


圖 24 定水頭補注初始滿管之土壤含水量變化(補注水頭高 58cm)

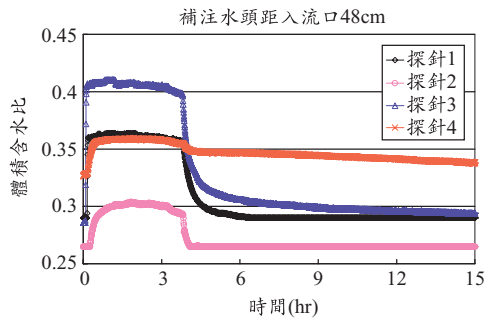


圖 22 定水頭補注初始空管之土壤含水量變化(補注水頭高 48cm)

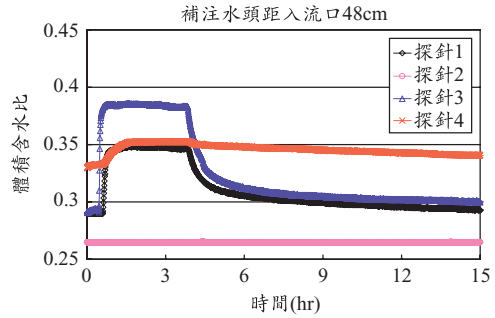


圖 25 定水頭補注初始滿管之土壤含水量變化(補注水頭高 48cm)

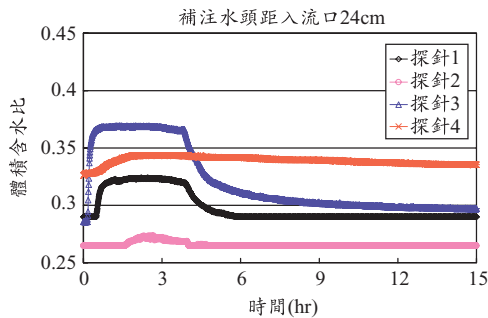


圖 23 定水頭補注初始空管之土壤含水量變化(補注水頭高 24cm)

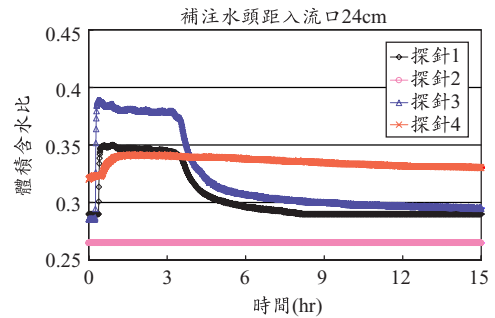


圖 26 定水頭補注初始滿管之土壤含水量變化(補注水頭高 24cm)

參考文獻

1. 吳義伯, 有效利用水資源滴灌法, 台糖通訊, 7, 20-24, 1987。
2. 沈育資, 黃威展, 鄭德隆及溫志超, 砂箱模擬地下水飽和水力傳導係數之研究, 農業工程研討會, 228-235 頁, 2002。
3. 劉建榮, van Genuchten 土壤特性曲線參數對濕鋒模擬與暫態補注量之影響, 逢甲大學土木及水利工程研究所碩士論文, 2001。
4. Al-Omran, A.M., Sheta, A.S., Falatah, A.M., and Al-Harbi, A.R., "Effect of drip irrigation on squash (*Cucurbita pepo*) yield and water-use efficiency in sandy calcareous soils amended with

- clay deposits,” *Agricultural Water Management*, 73, 43-55, 2004.
5. Ayars, J.E., Schoneman, R.A., Soppe, R.W., and Mead, R.M., “Irrigating cotton in the response of shallow ground water,” *Drainage in the 21st century: Food production and the environment*, Proc. Seventh Int. Drainage Symposium, ASAE, Orlando, FL, March, 82-89, 1998.
 6. Ayars, J.E., Phene, C.J., Hutmacher, R.B., Davis, K.R., Schoneman, R.A., Vail, S.S., and Mead, R.M., “Subsurface drip irrigation of row crops: a review of 15 years of research at the Water Management Research Laboratory,” *Agricultural Water Management*, 42, 1-27, 1999.
 7. Batchelor, C., Lovell, C., and Murata, M., “Simple microirrigation techniques for improving irrigation efficiency on vegetable gardens,” *Agricultural Water Management*, 32, 37-48, 1996.
 8. Bear, J., *Dynamics of fluids in porous media*, Dover, 1972, 764 pages.
 9. Bird, R.B., Armstrong, R.C., and Hassager, O., *Dynamics of Polymeric Liquids*, John Wiley & Sons, New York, 1987.
 10. Haman, D-Z and Izuno, F-T, “Principle of micro irrigation,” Fact Sheet AE-24, University of Florida, May 1989.
 11. Harris, G., Sub-surface drip irrigation: Advantages and limitations, DPI&F note, Note No.: 17650, 2005.
 12. Hutmacher, R.B., Mead, R.M., and Shouse, P., “Subsurface drip: Improving alfalfa irrigation in the west,” *Irrig. J.*, 45, 48-52, 1996.
 13. Lin, H-C J, Richards, D. R., Talbot, C. A., Yeh, G-T, Cheng, J-R, Cheng, H-P, and Jones, N. L., “A three-dimensional finite element computer model for simulating density-dependent flow and transport in variably saturated media Version 3.0,” The department of defense, Groundwater modeling system, 2000.
 14. Peterson, J. W., DeBoer, M. J., and Lake, K. L., “A laboratory simulation of toluene cleanup by air sparging of water-saturated sands,” *Journal of Hazardous Materials*, 72, pp. 167-178, 2000.
 15. Phene, C.J., Davis, K.R., Hutmacher, R.B., McCormick, R.L., and Meek, D.W., “Management and response of subsurface drip-irrigated tomatoes,” Proc. Int. Round 100 Conf. Micro-irrigation, Vol. III, Budapest, Hungary, 49-56, 1986.
 16. Phene, C.J., Davis, K.R., Hutmacher, R.B., and McCormick, R.L., “Advantages of subsurface drip irrigation for processing tomatoes,” *Acta Hortic*, 200, 101-113, 1987.
 17. Rashad, S., Schimek, G., Hoopes, J. A., and Tsay, T.-S., “Buoyant Miscible Plume in Heterogeneous Aquifer”, Proceedings, International Symposium on Ground Water, Hydraulics Division of American Society of Civil Engineers, July/August, 1991.
 18. Rashad, S., Hoopes, J. A., Fergusson, C., and Tsay, T.-S., “Plume Movement and Mixing in Heterogeneous Aquifer”, Proceedings of the Hydraulic Engineering sessions at Water Forum '92, Hydraulics Division of American Society of Civil Engineers, pp. 180-185, August, 1992.
 19. Schmaltz, B., Lennartz, B., and Wachsmuth, D., “Analysis of soil water content variations and GPR attribute distributions,” *Journal of Hydrology*, 267, pp. 217-226, 2002.
 20. Slater, L., Binley, A., Versteeg, R., Cassiani, G., Birken, R., and Sandberg, S., “A 3D ERT study of solute in a large experimental tank,” *Journal of Applied Geophysics*, 49, pp. 211-229, 2002.
 21. Smith, R.B., Oster, J.D., and Phene, C.J., “Subsurface drip produced the highest net return in the Westlands study area,” *Cal. Agric.* 45, 8-10, 1991.

收稿日期：民國 95 年 12 月 18 日

修正日期：民國 96 年 3 月 20 日

接受日期：民國 96 年 4 月 10 日