

滴水灌溉土壤滲水性之研究與應用

A Study on Intake Characteristics and Applications in Drip Irrigation

鄧東茂

施嘉昌

臺大農工系研究生

臺大農工系教授

Abstract

The wetting front may be important for analyzing the boundaries of irrigated soil at a practical point of view.

To analyze the intake condition in the soil of drip irrigation, we can apply the method of numerical analysis by computer to solve the partial differential equation of water in porous medium, that is:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla(D \nabla \theta) - \frac{\partial K}{\partial Z}$$

However, it would be more facile to get an empirical equation with experimental analysis.

The purpose of this paper is to simplify the effective factor of infiltration in the laboratory experiment, using experimental data to get the equation by applying dimensional analysis.

The infiltration distribution body of the trickle of constant discharge in soil can be expressed by the revolutionary elliptic equation. However, since the soil is largely influenced by gravitation, the elliptic center tends to move downward according to the time of infiltration. This is shown as:

$$\frac{R^2}{a^2} + \frac{(Z-k)^2}{b^2} = 1$$

in which $R = (X^2 + Y^2)^{1/2}$

a, b, k are the horizontal axis, the vertical axis of the ellipse, and the distance between the soil surface to the elliptic center, respectively. This can be got from the dimensional analysis and the experimental data:

$$\frac{a}{t^2 g} = 0.958 \left(\frac{Q}{t^5 g^3} \right)^{0.228}$$

$$\frac{b}{t^2 g} = 0.399 \left(\frac{Q}{t^5 g^3} \right)^{0.315}$$

$$\frac{k}{t^2 g} = 0.222 \left(\frac{Q}{t^5 g^3} \right)^{0.310}$$

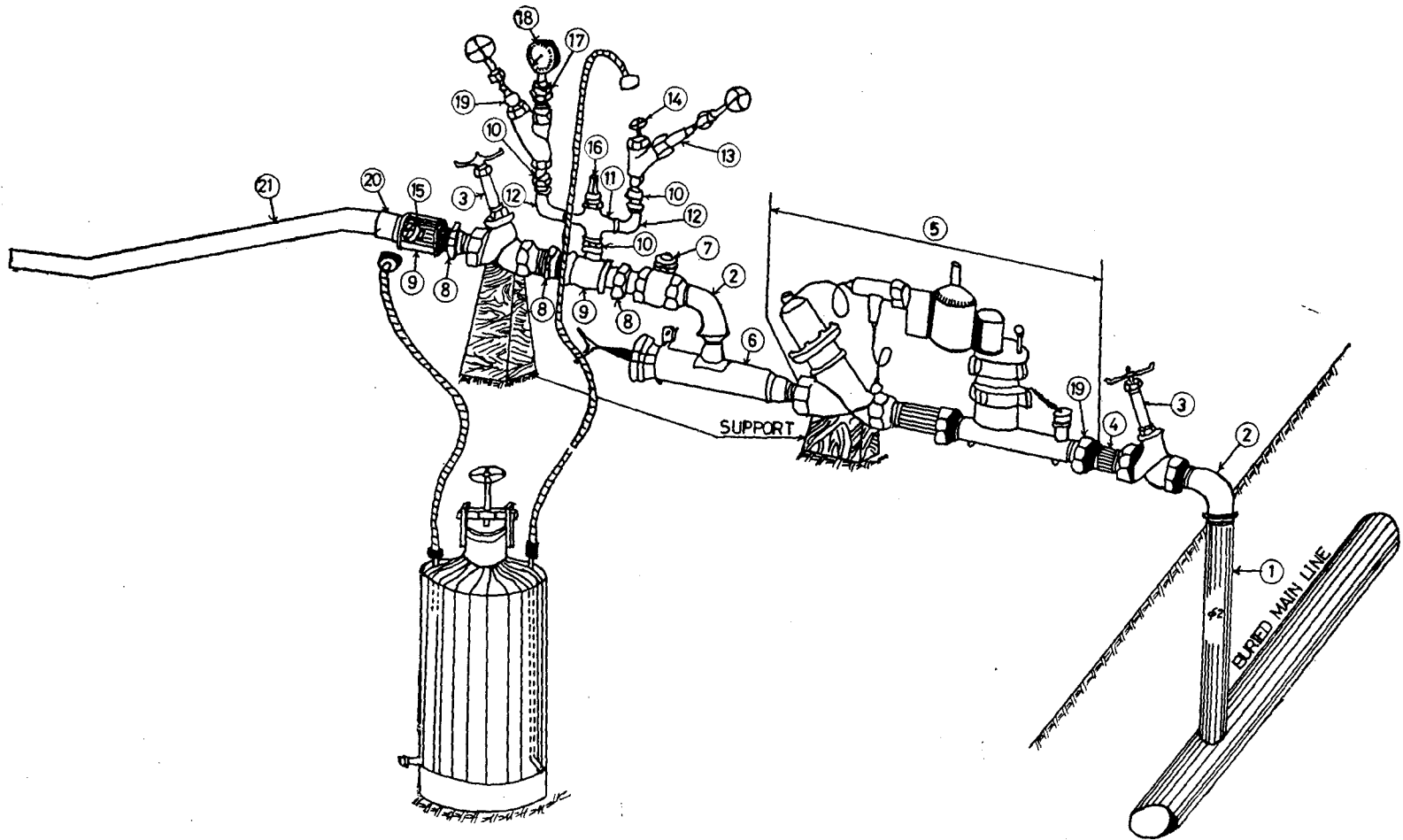
一、引 言

據統計世界上的水資源十分充沛，足夠供給全部人類之應用，其所以缺水之原因大致可分為三種：分佈不均，取水不便及水質不良。有史以來，人類即為缺水而奮鬥不懈，對於水文循環中之每一因子歷來均曾深入研究，諸如築壩以儲逕流，佈藥以減蒸發，水路之施工以減少滲漏損失等等。均以增加可利用之水

資源為目標，因此以有限可利用之水資源，除了應付種種需求量之外，亦應考慮水資源分配後之最大效益。

灌溉是自古以來成為經營農業的重要耕作技術之一，由於近代講求限量水資源之分配，灌溉之技術不再以古老的經驗方式操作，仍是隨着科學方法之日新月異而無時不在改進。灌溉之目的在補充天然降雨之

圖一 STRAINING AND FERTILIZING HEAD FOR DRIP IRRIGATION



LEGEND

1. Threaded Riser 2"
2. Service Elbows, 90°b-12-2"-URDAN
3. V-angle valve 03-2"-DOROT
4. Nipple 2"
5. BERMAD 2" Automatic water meter
6. Filter
7. No return valve 2"
8. Nipple hex-101-2"-URDAN
9. Tees reducing, b-191-2"-URDAN
10. Nipple hex-101- $\frac{3}{4}$ "-URDAN

11. Crosses, banded -50- $\frac{3}{4}$ "/ $\frac{3}{4}$ "-URDAN
12. Bends f.f. 90°-152- $\frac{3}{4}$ "-URDAN
13. V-angle valve -03- $\frac{3}{4}$ "-DOROT
14. Threaded coupler, outside thread $\frac{1}{2}$ -310-RAVIT
15. Valve coupler, brass, outside thread $\frac{3}{4}$ -310-5-RAVIT
16. Air valve
17. Reducer bushing $\frac{3}{4}$ -81- $\frac{1}{2}$ RAVIT
18. Manometer $\frac{1}{2}$ " (Pressure gage)
19. Union 2"
20. Starter 2" 97-83-71-PLASTRO
21. 2"-Polyethylene pipe-PLASTRO

一 不足以供應作物生理之需要，其基本要求為適時、適量及均勻。適時適量以補降雨之不足，使土壤含水量能經常維持在作物生長所需要之最適範圍。均勻灌溉則可增高灌溉效率，而減低灌溉成本，增加水資源之利用。

近年來，隨着工業之發展及農業之進步，旱地作物之價值日漸提高，在水資源經濟利用之觀點上，對於用水量比水田稻作甚少之旱作物更應提倡。如此，增加之水資源，可以應用在高價之旱作物上，而達高度的農產收益。

臺灣自光復以來，人口幾乎增加了一倍，目前繼續增加中，因此人口壓力乃成為土地高度開發與利用之主要因素。同時由於工商業之突飛猛進，部份優良農田，尤其是接近都市者，皆已改變為建築用地。因此，由於糧食的需要與工業原料的供求增加，不得不增闢耕地，目前平地旱田已利用殆盡，近年來山坡地之開發亦臻極限，然而，臺灣有廣大之砂丘地，其面積約計 18,000 公頃。由於受地形、土質及氣候等限制，尚未積極經營。假如能在灌溉技術上研究一套合理的灌溉方式，則 18,000 公頃的土地不失為一大可觀之生產資源。唯目前本省各地在旱作灌溉需水量及灌溉方法之研究上已有多年經驗，灌溉工作人員雖可根據以往實驗資料配水，予以灌溉，但也僅限於自然環境和氣候因素相同之地區才能應用，對於差異甚大的砂丘地則無法適應。

海岸砂丘地因土壤為砂土，保水力低，肥力差而滲透性大，肥份易被雨水或灌溉滲漏水淋洗流失，保肥力弱，加之砂丘地地形起伏不平，為克服上述特性，灌溉方式須用特殊之設備及方法。慣用之地表灌溉方法甚難有效地在海岸砂丘地區運用，砂丘地之輸水方式須用管路，而施灌方式，目前採用噴洒灌溉較多，但以海岸砂丘地臨海，受海風及季節風之影響很大，噴洒灌溉之方式其效率亦受很大之影響。

目前以色列在沙漠乾旱地區發明一種新的灌溉方法，名為滴水灌溉 (Drip Irrigation or Trickle Irrigation)，滴水灌溉有許多優於傳統灌溉方法 (噴洒灌溉、畦溝灌溉等) 之點，因此，去年 (1971) 七月農復會自以色列購入 $\frac{1}{2}$ 英畝 (約 0.2 公頃) 之滴水灌溉系統設備一組，撥交水利局崎頂海岸砂丘地灌溉利用研究實驗站先作試驗。本文採用資料除以該站初步實驗數據外，並在室內之各種滴嘴流量在砂土及砂質壤土上水分擴散情形做一比較，以試驗之結果求一經驗公式，估算流量，時間與土壤水分分佈之關係，

進而瞭解滴嘴間距之配置範圍，以為實際使用之參考。

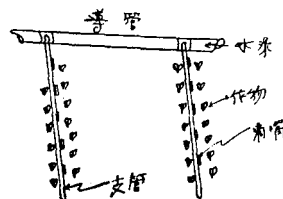
二、滴水灌溉系統及其特性

(A) 一組滴水灌溉系統之設備⁽¹⁾，可包括下列各項：

(1) 首部 (Head) (如圖一) 整個系統之應用在此控制，為連接水源到田區間之設備。包括接頭 (Coupling)、濾淨器 (Filter)、活門 (Valves)、壓力計 (Pressure gages)、自動量水錶 (Automatic Water Meter) 及液肥裝置 (Fertilizer Apparatus) 等。

(2) 導管 (Conducting Pipes) 為連通首部至田區支管之管路，其管徑大小視長度流量而定。

(3) 支管 (Distribution tubes) 為佈置在田區內之管路，支管相互平行，其間距視行栽作物之種類而定，管徑一般在 $\frac{1}{2}$ ~ $\frac{3}{8}$ 吋之間，最適長度在 100 ~ 140 呎。(如圖二)



圖二 導管與支管之佈置

(4) 滴嘴 (Nozzles) 引進系統之灌溉水，由滴嘴滴落於田區上。滴嘴之形式不一，具有一小孔塞，水由此孔塞之螺旋紋路流出。紋路之主要作用在消壓，因此水從滴嘴流出時，壓力近乎零，可避免土壤冲刷。滴嘴流量範圍通常在 0.4 ~ 2.2 每小時加侖。



照片 1 現場導管與支管之配置情形



照片 2 支管在田區佈置方式



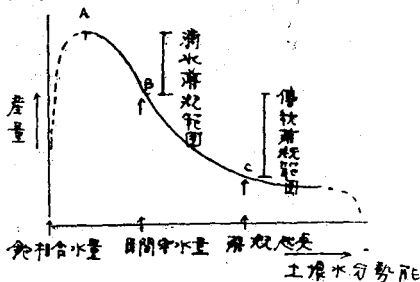
照片 3 首部與液肥設備

使用滴水灌溉之設備，係將灌溉水由水源引進系統之首部，經過自動量水錶之控制藉以決定一次灌溉水量，而得到達該水量時自動關閉。在灌溉水流入導管之前約有 $\frac{1}{3}$ ~ $\frac{1}{2}$ 之水流經過液肥裝置，而使液肥於導管中稀釋於灌溉水中，經由導管、支管之輸送，水即從滴嘴流入田區，以供作物利用。

(B) 滴水灌溉之特性

滴水灌溉之特性已由實驗證明，有許多優於傳統灌溉方法之點，即：

(1) 從土壤水分觀點而言 由於液肥之裝置及頻繁而短時間的灌溉下，它能建立理想的生長環境，這



圖三 作物產量與水分張力之關係

種理想的環境，依靠系統的簡便操作，使其連續不斷。此理想的環境條件即提供作物生長之最適水分範圍。因其土壤水分含量保持在高於田間容水量而小於飽和含水量之範圍。通常此水分範圍對作物而言，可得最高產量。(如圖三)

(2) 就灌溉管理而言 是對畦溝灌溉之一種有意義的改善，如滴嘴排列間距較密，則濕潤圈將在極短之時間相交而形成一濕潤帶。因此它有畦溝灌溉之實而無水流在畦溝前進之形。非但可減少水量損失增加灌溉效率，並可使灌溉水達均勻狀態。同時灌前不需水準測量及精細的整地，亦無流水之沖蝕及末端逕流之發生。

(3) 就植物水分生理而言 對含鹽分灌溉水及鹽分地之灌溉，因連續灌溉，保持低土壤水分張力，可降低鹽分滲透作用所引起之張力，減少影響植物吸收水分之機能，使一般傳統灌溉方式難以經營農業之土地亦能從事生產。

(4) 就土壤本身而言 土壤不再是一蓄水庫 (Reservoir) 的作用，而僅為支持作物根系及供吸收灌溉水分之構造物。故對於不良構造 (Poor structure) 之粗質地亦能表現良好之功能。

(5) 灌溉用水量在此種灌溉方式下是用管路輸送至田區，因此可免除水路滲漏及蒸發之浪費。同時管路受壓在崎嶇不平之地亦不必考慮坡度問題而使滴水正常。

三、文 獻 探 討

水分在土壤中變化的過程，就灌溉立場上而言，其區分方式一般側重於各種不同力 (吸附力、吸着力、毛管力及重力等) 均趨趨勢下水分對作物生理上的有效性，可分為吸濕係數、凋萎點、毛管斷裂濕度、田間容水量和飽和含水量等。其意義僅為灌溉應用上之方便。事實上各種水分常數之範圍並無明顯的界限存在，然而，從物理觀點上去探討，就應從導水係數 K (Conductivity) 和勢能梯度 (Potential gradient) 來推斷。

有關於土壤水分運動之理論，最早被應用之公式為 Darcy 氏公式 (1856)⁽²⁾。

$$\bar{U} = -K \nabla \Phi$$

式中 \bar{U} : 向量流速

K : 介質之導水係數

Φ : 總勢能

$$\Phi = (p/\rho g + \Omega)$$

p : 壓力 (由靜水壓力及吸附作用產生力之總

合)

ρ : 水之密度

g : 重力加速度

Ω : 每單位水重, 外力的勢能 (外力在此系統中是指重力而言)。亦即 $\Omega = Z$

上式最初被使用於飽和狀態, 即導水係數 K 值為定值之情況下。1931年 Richards, L. A. 將 Darcy 氏公式應用在不飽和狀態中, 後來由 Childs 與 Callis-George 等以實驗證明 Darcy 氏公式在土壤水分不飽和下仍然適用。所不同者, 土壤在水分不飽和之狀態下, 導水係數 (K) 值成變值為土壤水分含量 (θ) 之函數。至於理論上證明上述觀念之存在性, 仍是假設土壤中水與空氣二者界面之拖力 (Drag Force) 為小至可以忽略。

水分滲入土中是一種複雜的現象。Bordman 和 Colmann⁽³⁾ 在1943年曾就入滲的過程中, 將水分運行的形式區分為五層即:

(A) 飽和層 (Saturated zone) 飽和度 (S) 趨近於 1, 土壤孔隙充滿了水分, 一般認為在無水頭之狀況下, 其厚度約有 1 公分, 最大可達 1.5 公分左右。

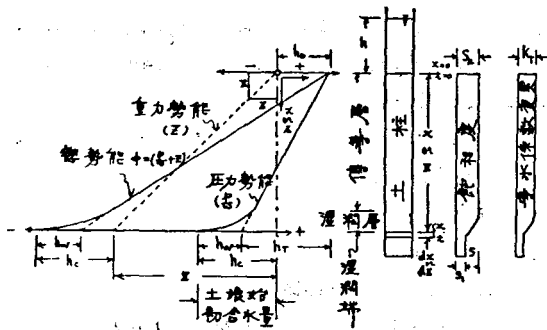
(B) 過渡層 (Transition zone) 土壤水分含量, 由飽和急速減至水分當量與飽和含水量之間。

(C) 傳導層 (Transmission zone) 土壤水分含量變化較少, 且隨時間之增加而延伸。

(D) 濕潤層 (Wetting zone) 土壤水分含量急速降低。

(E) 潤緣亦稱濕潤端 (Wetting front) 水分滲透可見之極限。

1955年 Hansen⁽⁴⁾ 氏認為傳導層之水分含量約達 80%, 其導水係數 (k_r) 可假定為常數 (如圖四) 利用此種假設, Hansen 氏應用了 Darcy 氏公式



圖四

及連續方程式 (Continuity Equation) 導出潤緣前進線與時間之關係式為:

$$t = \frac{x^2}{2} \frac{ns}{k_r} h_r \quad (\text{水平流})$$

$$t = \frac{ns}{k_r} [h_r \{1 - \ln(h_r + z)\} + z] \quad (\text{垂直流})$$

上二式中 n, s, k_r, h_r 皆為常數

t : 入滲時間

x : 水平軸

Z : 垂直軸

n : 孔隙度 $n = \frac{V_w}{V_v}$

s : 飽和度 $s = \frac{V_w}{V_v}$

k_r : 傳導層之導水係數

h_r : 消失在傳導層的總壓力勢能

v : 全部體積

v_v : 孔隙體積

v_w : 水之體積

用擴散原理 (Principle of Diffusion) 來解釋土壤水分運動的現象起始於 Buckingham 氏之啓示, 應用質量不減原理 (Principle of Mass Conservation), Darcy 氏公式及擴散原理, Klute⁽⁵⁾ 導出水流公式為

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot D \nabla \theta - \frac{\partial K}{\partial Z}$$

式中 θ : 體積比土壤含水量

t : 時間

D : 擴散係數 (Diffusivity)

K : 導水係數

Z : 地心垂直軸

1957年 John Philip⁽⁶⁾ 運用此公式, 以數值分析法 (Numerical Analysis) 求解得垂直濕潤端與時間成無窮級數 (Power Series) 之關係, 其式如下:

$$Z = \phi t^{1/2} + \lambda t + \Psi t^{3/2} + \dots + F_m(\theta) t^{m/2} + \dots$$

式中 $\phi, \lambda, \Psi, \dots, F_m(\theta)$ 各係數, 為土壤水分擴散度, 土壤始初含水量及地面水深等之函數, 由於 Philip 之研究對土壤之以往濕潤乾燥情況視作可忽略之因素, 故若在固定含水量時, 則 $\phi, \lambda, \Psi, \dots, F_m(\theta)$ 各值均可視為常數, 上式在時間 (t) 為有限值時, 收斂甚速。即 $\lambda \ll \phi, \Psi \ll \lambda, \dots, F_m(\theta) \ll F_{m-1}(\theta)$ 一般情形小達十倍以上, 故第三項以後諸項均可忽略, 而其精確度已足夠。故可簡化為:

$$Z = \phi t^{1/2} + \lambda t$$

至於水平濕潤端與時間之關係亦如 Hansen 氏等之導演公式，其式如下：

$$X = \phi t^{1/2} + a$$

式中 a 為一極小之常數，可忽略。

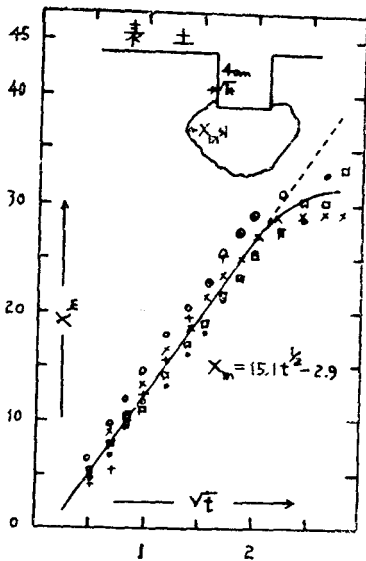
利用 Philip 氏導演之公式，Sdrik Toksoz⁽⁷⁾ 等假設 ϕ, λ, a 等為實驗常數，並於田間實地觀測矩形溝在無水頭之狀況下，濕潤端與時間之關係所得結果甚為接近，(如圖五、六)

又 Fok (霍雨時)⁽⁸⁾ 則利用 Hansen 氏論文所提，水平土壤水分移動距離與時間之關係以

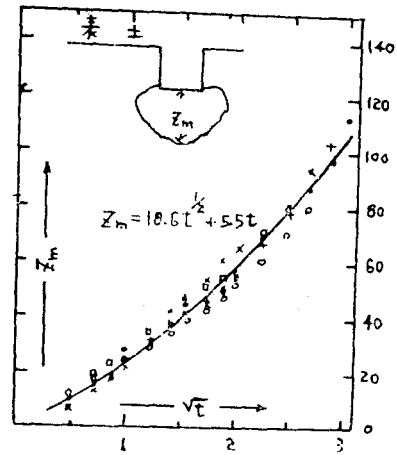
$$X = at^b$$

垂直下滲土壤水分移動距離與時間之關係以：

$$Z = ct^d$$



圖五 水平濕潤端與時間之關係



圖六 垂直濕潤端與時間之關係

二式中 a, b, c, d 均為實驗常數。利用上二式合併求得二向度 (Two-dimension) 水分移動公式，並以實驗證明所得結果亦極可靠。

滴水灌溉土壤滲水之情形，按照 Bordman 和 Colmann 之層次區分法，大部份應屬於傳導層以上。因為根據滴水灌溉之特性，土壤含水量經常保持在飽和含水量與田間含水量之間。

至於其水分擴散之情形，因屬二向度 (Two-dimension, R, Z)。故與 Philip 氏應用擴散原理所導出之公式，似有關聯。

四、試驗方法

(1) 試驗材料及使用裝置：

試驗所採用之土壤有兩種，其一為竹南崎頂海岸砂丘地試驗站田區之砂土，其二為臺南佳里鎮北門農校後之砂質壤土。二者之物理性質於實驗室分析結果如表一及表二。

表一 竹南崎頂砂丘地土壤物理性分析結果

土樣	深度 公分	土壤機械成分				假 比 重	真 比 重	飽 和 水 量 %	田間容水量 %			凋萎點 15atm %
		土壤 別	砂粒 %	粉粒 %	粘粒 %				田間實測	水份當量	1/3Atm	
A	0	砂土	95.0	1.0	4.0	1.63	2.68	30.23	7.24	3.03	3.64	2.18
A	20	"	95.5	0.5	4.0	1.64	2.64	26.40	7.88	2.92	3.43	2.14
A	40	"	95.0	1.0	4.0	1.65	2.57	28.70	11.96	3.05	3.39	2.15
B	0	"	96.8	0.2	3.0	1.63	2.70	29.38	9.73	2.98	3.52	2.24
B	20	"	95.5	0.2	4.3	1.57	2.67	25.65	9.17	3.25	3.21	2.36
B	40	"	95.0	0.8	4.2	1.61	2.62	30.52	9.77	3.54	4.09	2.54
C	0	"	97.0	0.2	2.8	1.68	2.50	29.31	5.42	2.58	2.81	1.95
C	20	"	96.0	0.9	3.1	1.64	2.67	32.02	5.92	2.77	3.17	2.01

C	40	砂土	95.0	1.2	3.8	1.60	2.60	30.35	8.06	2.73	3.44	2.27
D	0	"	96.5	0.7	2.8	1.63	2.53	30.10	5.41	2.56	2.89	1.99
D	20	"	96.0	1.0	3.0	1.65	2.60	30.45	7.22	2.85	3.24	1.92
D	40	"	96.0	0.8	3.2	1.66	2.62	30.61	9.00	2.86	3.15	2.03
E	0	"	95.0	0.7	4.3	1.66	2.76	28.87	8.71	3.58	4.36	2.50
E	20	"	94.5	1.5	4.0	1.62	2.62	30.45	10.06	3.39	4.33	2.23
E	40	"	94.0	1.0	5.0	1.59	2.64	33.31	10.54	4.34	4.70	2.77

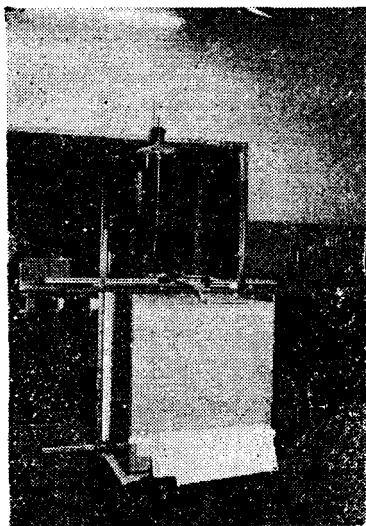
表二 臺南佳里鎮北門農校後土壤物理性分析結果

土樣	土壤機械成分			假比重	水分當量 %	凋萎點 15atm %	
	土壤別	砂粒 %	粉粒 %				粘粒 %
1	砂壤土	52.5	33.0	14.5	1.458	11.43	4.11
2	"	57.5	31.0	9.5	1.455	10.86	4.09
3	"	60.3	26.2	13.5	1.436	11.48	3.97
4	"	57.3	30.2	12.5	1.474	11.97	4.12

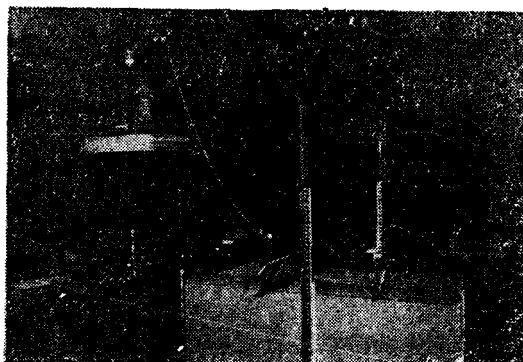
試驗之裝置器材有玻璃滴管及塑膠滴嘴數個，試驗箱、定水頭給水瓶各一及支撐用角鋼數隻、橡膠管等。

試驗箱由無色透明之壓克力板黏製而成。其大小尺小為 75cm×60cm×50cm。壓克力板之厚度為 1 公分，由於壓克力板較富彈性，箱之長度達 75 公分，惟恐裝填試驗土壤時中間部分變形，故於中間以角鋼支架以避免土壓之影響。

定水頭給水瓶為 20 公升容量之玻璃瓶，至於定水頭給水瓶與滴嘴之間採用橡膠管連通。



照片 4 單一滴嘴試驗設備



照片 5 雙滴嘴試驗設備

(2) 試驗前之準備工作：

(A) 土壤裝填工作

先將試驗之土壤均勻風乾至可以篩析之程度，然後以 No.28 之篩網，將全部試驗土壤過篩。篩後之土壤仍然平鋪地上使之風乾。

當土壤風乾後，即行裝填工作，裝填方式有兩種：一為土壤不壓實，僅於裝填進行時，隨時將容器稍微振盪，以期其顆粒排列趨於穩定。另一種是經過壓實處理，就是在裝填過程中，於每次平鋪試土厚度 2 至 4 公分時，將其搗實再於上面劃出淺而密之彎曲紋溝。然後再行裝填次層，上述搗實之目的是希望儘量能與現地土壤結構相吻合，紋溝之作用在避免形成土層使成均一土壤結構。裝填土壤之高度為 55 公分。

(B) 流量檢定

本試驗採用之流量，係以田間使用流量範圍內（約 0.4~2.2 每小時加侖）減半處理。此因試驗時土壤之滲水情形僅為半圓錐體。至於其大小則由水頭高差及滴嘴開口之大小來決定。本試驗使用之水頭高差在 44 公分到 51 公分之間。每次試驗前對每一流量之檢定，與試驗時之水頭高差一致。試驗前以量筒接取 20 分鐘之水量，重複三次，求其流量平均數以為根據，並與給水瓶水量消失相比較以為檢驗。本試驗使用之滴嘴流量有 33.61 c.c./min, 49.83 c.c./min, 52.00 c.c./min, 54.00 c.c./min 及滴管流量為 2.96 c.c./min。

(3) 試驗步驟

其程序如下：

- (A) 測定試驗前土壤水分含量。
- (B) 修整試驗箱內土壤表面使其平齊。
- (C) 安裝滴嘴至規定位置，使其位置穩固。
- (D) 記錄試驗前之給水瓶水尺讀數。
- (E) 接通水流，試驗開始，計時。
- (F) 按一定之時間（時間之間隔視兩濕潤端之間距而定，以能明顯區分為原則），於壓克力板上描繪濕潤線。
- (G) 試驗結束，讀取試驗後給水瓶水尺讀數。
- (H) 試驗後每土深 5 公分深採取土樣測定土壤水分及假比重。

(4) 試驗處理方式

第一次試驗為不壓實砂土以流量 33.61 c.c./min 處理，藉以比較不壓實處理與壓實處理之土壤顆粒排列不同而影響水流入滲之分佈情形。第二、三、四次試驗以壓實處理，流量分別為 33.61, 48.93, 與 54.00 c.c./min 等。第五次試驗使用二個滴嘴，其間距為 35 公分，土壤壓實，流量各為 52.00 c.c./min。第六次試驗，土壤為砂質壤土，土壤壓實，為避免表面產生逕流，使用流量小至 2.96 c.c./min，以觀察土壤類型不同，其濕潤情況之差異性。

五、分析 方 法

水流移動現象在所謂亂流 (Turbulent flow) 的情況下，其影響之因素至為複雜，以致於無法用理論方法直接求解，而須以計劃的試驗得一經驗公式，即所謂因次分析法 (Dimensional Analysis)⁽⁹⁻¹⁰⁻¹¹⁾。

滴水灌溉水流在土壤中運動的現象，如以電子計算機運用數值分析法 (Numerical Method) 解偏微分方程式⁽¹²⁾，須用龐大的程式，方能求得較精確解。唯此點在現場的估算，不如求其經驗公式以代數解來得簡便。因此本文分析試驗結果，亦採用因次分析法，求其經驗公式，以為灌溉應用之參考。

因次分析可利用在許多不同變數 (Variable) 中獲得函數的關係式，而以無因次參數 (Parameter) 表示。一個完整的物理方程式必須為因次齊次式，由此項事實，可減化成許多無因次參數構成之函數的方程式。此為因次分析之基本理論。

一般使用之因次分析法有兩種：(一)雷來法 (Rayleigh Method) (二)巴金漢 (Buckingham) π 方法。本文採用雷萊法。雷萊法的因次分析法，以指數方

程式的形式表示，而指數方程式的兩邊因次必須齊次的，若 A 為一些獨立變數 A_1, A_2, A_3, \dots 等的函數，函數方程式可寫成下列的一般形式即：

$$A = \phi (A_1, A_2, A_3, \dots)$$

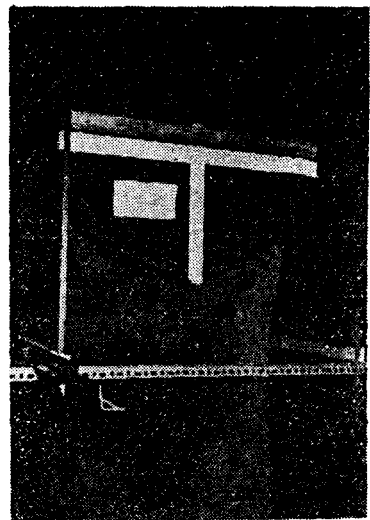
由因次齊次式原理，此方程式可表示為：

$$A = C (A_1^a, A_2^b, A_3^c, \dots)$$

C 為無因次常數，由問題中之物理特性來決定，或由實驗計量而定之。無因次參數首由估計指數 a, b, c, ……而獲得，以致此方程式為因次上齊次的。然後將那些變數如乘方等聚集成無因次的參數。

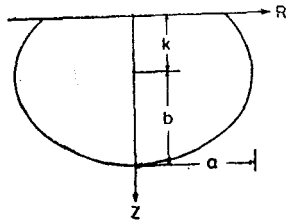
從 Hansen 氏和 Philip 氏等對土壤入滲現象之探討，知時間為影響濕潤端前進的最主要因素之一，唯他們所假設的都是在有水頭或是充分給水之狀態下，所導出的公式。滴水灌溉土壤的滲水性不同於 Hansen 氏等所處理的情況，因滴水灌溉並非完全充分給水亦即水的供給並未達到入滲容量 (Infiltration Capacity) 也就是說土壤在某種情況下，對於落在其上的水，所能吸收之最大速率。因此另一函數必須考慮即滴嘴流量 (Q) 之大小，滴水灌溉土壤之入滲率 (I) 可以說等於流量 (Q) 之大小。又使用滴水灌溉之地區一般為半乾燥或乾燥之砂土地。砂土之顆粒較大，其總孔隙度 (n) 值雖然較其他種土壤如壤土、粘土等為小，然其孔隙遠較其他土壤為大，故水流在砂土中流動，受重力 (g) 之影響遠較受毛管力之影響為大，故重力亦為影響濕潤端前進之主要函數之一。

至於滴水灌溉使用單一滴嘴時浸潤體之形狀可由實驗得知。(如照片六)



照片 6 浸潤體頂視圖

以橢圓方程式可以表示滴水灌溉土壤水分浸潤體之大小。因砂土受重力之影響甚大，故橢圓中心位置隨入滲時間而下移。旋轉體橢圓方程式為：



圖七 浸潤體側視示意圖

$$\frac{R^2}{a^2} + \frac{(z-k)^2}{b^2} = 1$$

式中 $R = (X^2 + Y^2)^{1/2}$

a, b, k 可由因次分析與試驗資料統計求得即

$$a = \phi(t, Q, g)$$

$$a = C_1(t^\alpha Q^\beta g^\gamma)$$

使用 M L T 系統，方程式中每一變數代以適當的因次，則

$$L = (T)^\alpha \left(\frac{L^3}{T}\right)^\beta \left(\frac{L}{T^2}\right)^\gamma$$

就因次均勻性而言，兩邊因次之指數必得一致，因此

$$L: 1 = 3\beta + \gamma \quad (1)$$

$$T: 0 = \alpha - \beta - 2\gamma \quad (2)$$

從(1)得

$$\gamma = 1 - 3\beta \quad \text{代入(2)得}$$

$$\alpha = 2 - 5\beta$$

故 $a = C_1(t^{2-5\beta} Q^\beta g^{1-3\beta})$

$$= C_1 t^2 g \left(\frac{Q}{t^5 g^3}\right)^\beta$$

同理 $b = C_2 t^2 g \left(\frac{Q}{t^5 g^3}\right)^\beta$

$$k = C_3 t^2 g \left(\frac{Q}{t^5 g^3}\right)^\beta$$

上式 a：橫軸（單位：公分）

b：縱軸（單位：公分）

k：為土面與橢圓中心之距離（單位：公分）

t：入滲時間（單位：分鐘）

Q：流量（單位：每分鐘立方公分）

g：重力加速度（單位：每分鐘每分鐘公分）

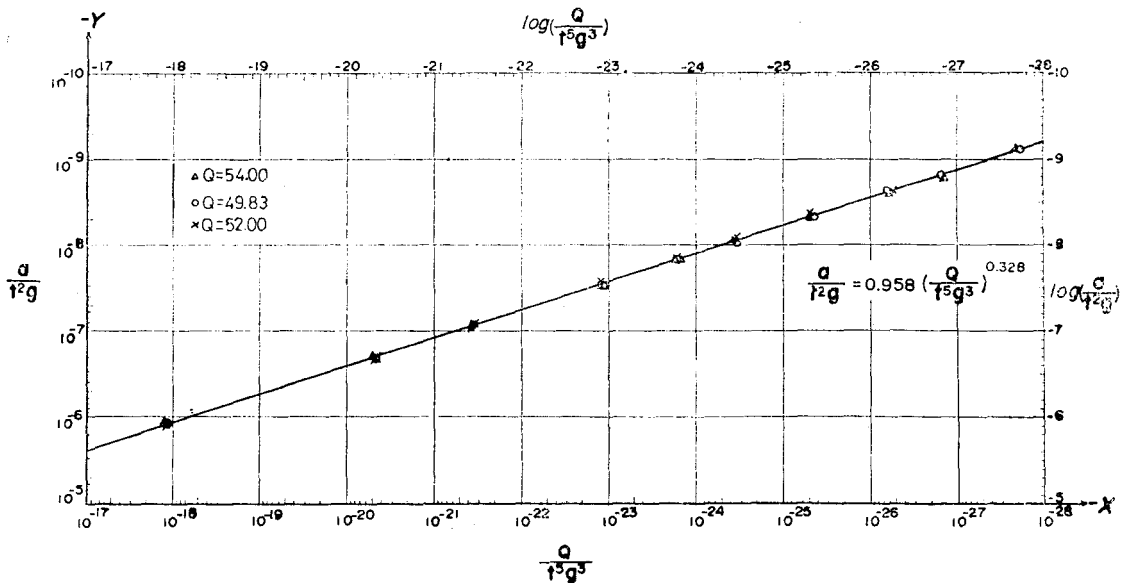
六、試驗結果與分析之比較

根據試驗資料，以流量為 54.00 c.c/min, 49.83 c.c/min 及 52.00 c.c/min（採用浸潤面未交採前之資料）三組資料統計得，

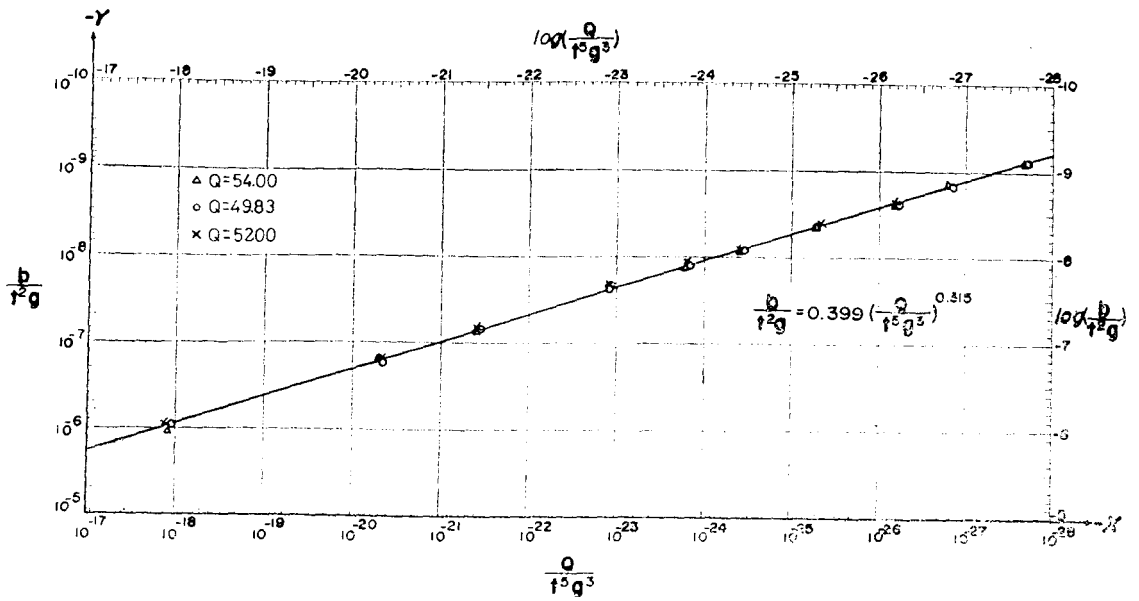
$$\frac{a}{t^2 g} = 0.958 \left(\frac{Q}{t^5 g^3}\right)^{0.328}$$

$$\frac{b}{t^2 g} = 0.399 \left(\frac{Q}{t^5 g^3}\right)^{0.315}$$

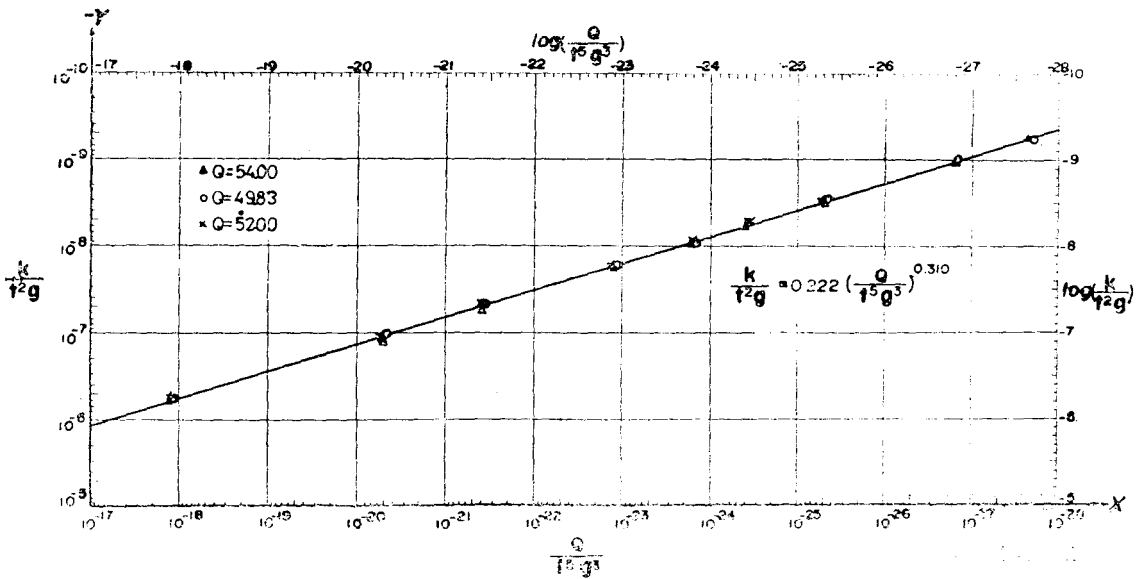
$$\frac{k}{t^2 g} = 0.222 \left(\frac{Q}{t^5 g^3}\right)^{0.310}$$



圖八 橢圓形橫軸 (a) 與流量 (Q) 之無因次關係



圖九 橢圓形縱軸 (b) 與流量 (Q) 之無因次關係



圖十 橢圓形中心到土面之距離 (k) 與流量 (Q) 之無因次關係

茲將試驗結果說明如下：

(1) 第一次試驗

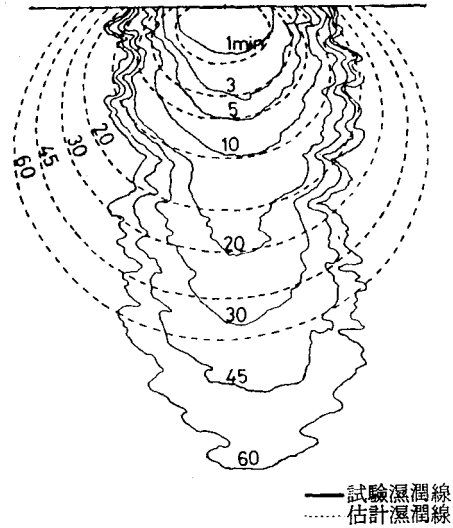
土壤類別：砂土

土壤處理方式：不壓實

使用流量：33.61 c.c./min

滴嘴個數：1

結果：(如圖十一)入滲時間為60分鐘時，浸潤面之深度為38.5公分，而橫向分佈在距表土8公分深處最大達20.5公分，表土面之濕潤圈直徑為16.5公分。至於試後一小時之土壤水分含量(如表三)。



圖十一 砂土不經壓實，使用流 $Q=33.61\text{c.c./min}$ 量時，土壤水分浸潤面之圖形。

表三

罐號	土深 (cm)	濕加土罐重 (g)	乾加土罐重 (g)	罐重 (g)	水分重 (g)	乾土重 (g)	含水量 %		假比重	備註
							重量比	體積比		
674		93.8822	93.6036	43.6345	0.2786	49.9691	0.558	0.855		試驗前測定
637	0	92.1331	87.9392	37.7213	4.1939	50.2179	8.351	12.811		試驗後測定
635	5	87.5720	83.4485	43.8908	4.1235	39.5577	10.424	15.990		" "
82	10	89.0142	83.4086	41.8822	5.6056	41.5264	13.499	20.707		" "
52	15	85.5375	80.0938	37.0410	5.4437	43.0528	12.644	19.396		" "
110	20	78.6785	72.9386	34.2438	5.7399	38.6948	14.834	22.755		" "
645	25	86.5805	81.3227	41.1997	5.2578	40.1230	13.104	20.102		" "
93	30	75.4450	71.1035	37.0731	4.3415	34.0304	12.758	19.570		" "
623	35	72.1331	68.4971	41.2098	3.6360	27.2873	13.325	20.440		" "
1	20	265.2	241.4	88.0		153.4			1.534	

(2) 第二次試驗

土壤類別：砂土

土壤處理方式：壓實

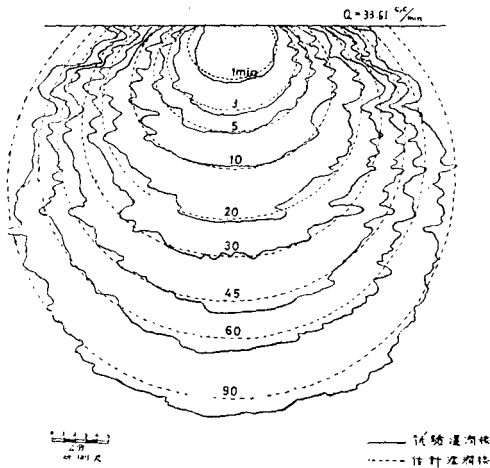
使用流量：33.61 c.c./min

滴嘴個數：1

結果：(如圖十二)入滲時間90分鐘時，浸潤面之深度為34.6公分，而橫向分佈在距表土15公分深處，最大達38.6公分，表土面之濕潤圈直徑為21公分，至於試驗後一小時之土壤水分含量(如表四)。

表四

罐號	土深 (cm)	濕加土罐重 (g)	乾加土罐重 (g)	罐重 (g)	水分重 (g)	乾土重 (g)	含水量 %		假比重	備註
							重量比	體積比		
681		101.1243	100.7731	41.3574	0.3512	59.4157	0.591	0.945		試驗前測定
637	0	76.3550	74.8780	37.7213	1.4770	37.1567	3.975	6.352		試驗後測定
635	5	83.1306	80.2130	43.8908	2.9176	36.3222	8.033	12.836		"
82	10	80.3950	76.8850	41.8822	3.5100	35.0028	10.028	16.024		"
52	15	81.5978	77.2505	37.0410	4.3473	40.2095	10.812	17.277		"
110	20	66.6643	63.6079	34.2438	3.0564	29.3641	10.409	16.633		"
645	25	73.8725	70.5926	41.1997	3.2799	29.3929	11.159	17.832		"
93	30	72.0528	68.5990	37.0731	3.4538	31.5259	10.955	17.507		"
623	35	77.5280	74.2330	41.2098	3.2950	33.0232	9.978	15.945		"
1	10	267.72	248.50	88.0		160.9			1.609	"
2	30	275.72	258.00	99.3		158.7			1.587	"



圖十二 砂土經壓實後使用流量 $Q=33.61\text{c.c./min}$ 時，土壤水分浸潤面之圖形

表五

罐號	土深 (cm)	濕加土罐重 (g)	乾加土罐重 (g)	罐重 (g)	水分重 (g)	乾土重 (g)	含水量		假比重	備註
							重量比	體積比		
681		99.4530	99.1320	41.3574	0.3210	57.7746	0.556	0.893		試驗前測定
637	0	73.6567	72.1329	37.7213	1.5238	34.4116	4.428	7.116		試驗後測定
635	5	76.7985	74.3620	43.8908	2.4365	30.4712	7.996	12.850		"
82	10	72.6330	70.3456	41.8822	2.2874	28.4634	8.036	12.914		"
52	15	73.6413	70.5100	37.0410	3.1313	33.4690	9.356	15.035		"
110	20	62.4721	60.0910	34.2438	2.3811	25.8472	9.212	14.804		"
645	25	73.2880	70.5550	41.1997	2.7330	29.3553	9.310	14.961		"
93	30	66.3126	63.4870	37.0731	2.8256	26.4139	10.697	17.191		"
623	35	72.9100	70.0060	41.2098	2.9040	28.7962	10.085	16.206		"
621	40	74.3886	71.4238	40.9630	2.9648	30.4610	9.733	15.641		"
1	15	266.30	249.50	88.00		161.5			1.615	"
2	20	275.6	259.20	99.30		159.9			1.599	"

(3) 第三次試驗

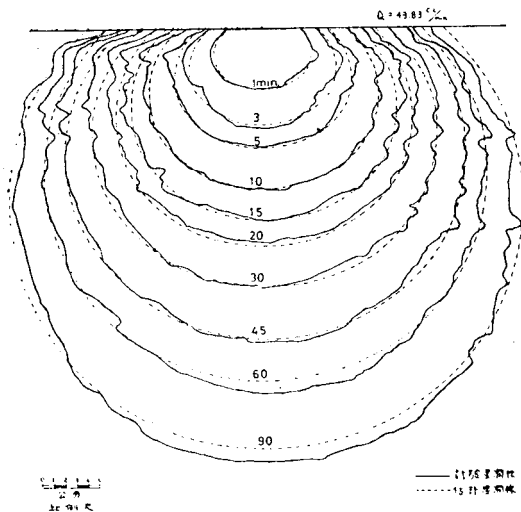
土壤類別：砂土

土壤處理方式：壓實

使用流量：49.83 c.c./min

滴嘴個數：1

結果：(如圖十三) 入滲時間為90分鐘時，浸潤面之深度為38.4公分。橫向分佈在距表土17.2公分深處最大達44.6公分，表土面濕潤圈直徑為27.8公分，至於試驗後一小時之土壤含水量(如表五)。



圖十三 砂土經壓實後使用流量 $Q=49.83 \text{ c.c./min}$ 時，土壤水分浸潤面之圖形

(4) 第四次試驗

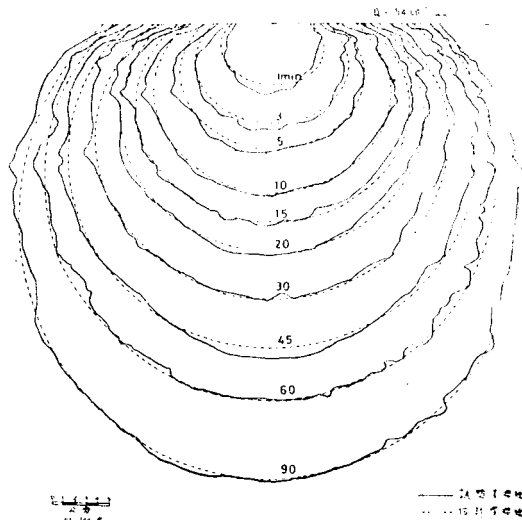
土壤類別：砂土

土壤處理方式：壓實

使用流量：54.00 c.c./min

滴嘴個數：1

結果：(如圖十四) 入滲時間為90分鐘時，浸潤面深度達40公分，而橫向分佈在距表土17公分深處最大達43.8公分，表土面濕潤圈直徑為28公分。至於試驗後一小時土壤含水量(如表六)。



圖十四 砂土經壓實後使用流量 54.00 c.c./min 時，土壤水分浸潤面之圖形。

表六

罐號	土深 (cm)	濕加土罐重 (g)	乾加土罐重 (g)	罐重 (g)	水分重 (g)	乾土重 (g)	含水量 %		假比重	備註
							重量比	體積比		
681		99,2580	98,9286	41,3574	0,3294	57,5712	0,572	0,919		試驗前測定
637	0	67,7440	66,5308	37,7213	1,2132	28,8095	4,211	6,767		試驗後測定
635	5	70,9944	68,7000	43,8908	2,2944	24,8092	9,248	14,862		"
82	10	75,8654	72,5657	41,8822	3,2997	30,6835	10,754	17,282		"
52	15	67,0210	64,3596	37,0410	2,6614	27,3186	9,742	15,656		"
110	20	60,9720	58,5647	34,2438	2,4073	24,3209	9,898	15,906		"
645	25	72,5026	69,5945	41,1997	2,9081	28,3948	10,242	16,458		"
93	30	66,1260	63,5355	37,0731	2,5905	26,4624	9,789	15,732		"
623	35	66,2600	64,3000	41,2098	1,9600	23,0902	8,488	13,641		"
621	40	70,5425	67,8120	40,9630	2,7305	26,8490	10,170	16,343		"
674	45	77,6150	74,8586	43,6345	2,7564	31,2241	8,828	14,186		"
1	5	268,80	250,30	88,00		162,3			1,623	"
2	25	275,50	258,40	99,30		159,1			1,591	"

(5) 第五次試驗

土壤類別：砂土

土壤處理方式：壓實

使用流量：52.00 c.c./min

滴嘴個數：2 (間距：35公分)

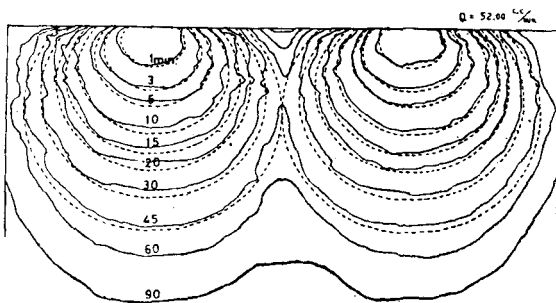
結果：(如圖十五) 本試驗兩個滴嘴之浸潤面在44分鐘時，即開始相交。至於試驗後一小時土壤含水量(如表七及表八，前者採土位置在滴嘴處之剖面，後者在兩滴嘴間之中點之剖面)。

表七

罐號	土深 (cm)	濕加土罐重 (g)	乾加土罐重 (g)	罐重 (g)	水分重 (g)	乾土重 (g)	含水量 %		假比重	備註
							重量比	體積比		
681		85,9536	85,7045	41,3574	0,2491	44,3471	0,562	0,891		試驗前測定
637	0	61,2575	59,9815	37,7213	1,2760	22,2602	5,732	9,097		試驗後測定
635	5	64,6394	62,9915	43,8908	1,6479	19,1007	8,627	13,692		"
82	10	64,7250	63,1833	41,8822	1,5417	21,3011	7,238	11,486		"
52	15	68,4078	65,5312	37,0410	2,8766	28,4902	10,097	16,024		"
110	20	59,7100	57,3000	34,2438	2,4100	23,0562	10,453	16,588		"
645	25	71,2880	68,3368	41,1997	2,9512	27,1371	10,875	17,262		"
93	30	62,2075	59,8140	37,0731	2,3935	22,7409	10,525	16,703		"
623	35	73,0483	70,1162	41,2098	2,9320	28,9065	10,143	16,097		"
621	40	69,4820	66,8775	40,9630	2,6045	25,9145	10,050	15,950		"
674	45	68,7700	66,6510	43,6345	2,1190	23,0165	9,206	14,611		"
1		263,60	246,60	88,00		158,6			1,586	"
2		274,30	258,10	99,30		158,8			1,588	"

表八

罐號	土深 (cm)	濕加土罐重 (g)	乾加土罐重 (g)	罐重 (g)	水分重 (g)	乾土重 (g)	含水量 %		假比重	備註
							重量比	體積比		
694		81,5788	81,3583	42,7775						試驗前測定
7	0	65,5068	64,0660	38,2145	1,4408	25,8515	5,573	8,849		試驗後測定
17	5	64,5792	63,0248	40,4872	1,5544	22,5376	6,897	10,946		"
37	10	62,7400	60,7588	33,6514	1,9812	27,1074	7,309	11,599		"
39	15	63,5436	61,4728	36,8788	2,0708	24,5940	8,420	13,362		"
103	20	60,3306	58,4500	37,5381	1,8806	20,9119	8,993	14,272		"
603	25	71,3500	68,6666	42,1553	2,6834	26,5113	10,123	16,063		"
613	30	69,9050	67,2818	41,7367	2,6232	25,5451	10,269	16,297		"
624	35	73,2760	70,6642	41,1310	2,6112	29,5332	8,844	14,035		"
641	40	68,4516	66,2230	40,4123	8,2286	25,8107	8,634	13,703		"
659	45	68,9861	66,8182	39,9565	2,1679	26,8617	8,071	12,808		"



圖十五 滴嘴間距35公分，砂土經壓實後，使用流量各為 52.00 c.c/min 時，土壤水分浸潤面之圖形

(6) 第六次試驗

土壤類別：砂質壤土

土壤處理方式：壓實

使用流量：2.96c.c/min

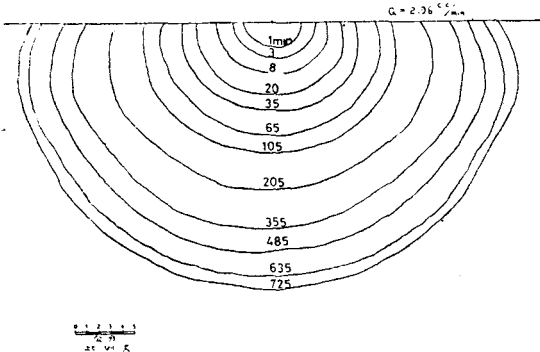
滴管個數：1

結果：(如圖十六) 試驗後一小時土壤含水量 (

如表九)。

表九

罐號	土深 (cm)	濕加土重 (g)	乾加土重 (g)	罐重 (g)	水分重 (g)	乾土重 (g)	含水量 %		假比重	備註
							重量比	體積比		
674		72.3597	71.9955	43.6345	0.3642	28.3610	1.284	1.950		試驗前測定
603	0	65.7241	61.0970	42.1553	4.6271	18.9417	24.428	37.094		試驗後測定
613	5	62.0618	58.8595	41.7367	3.2023	17.1228	18.702	28.399		"
624	10	66.3153	62.6970	41.1310	3.6183	21.5660	16.778	25.477		"
641	15	61.8182	58.3920	40.4123	3.4262	17.9797	19.056	28.936		"
659	20	63.9548	60.9100	39.9565	3.0448	20.9535	14.531	22.066		"
3		277.9	247.8	94.4		153.4			1.534	"
4		274.3	245.1	94.8		150.3			1.503	"



圖十六 砂質壤土經壓實後使用流量 $Q=2.96 \text{ c c/min}$ 時，土壤水分浸潤面之圖形。

分佈均勻度。同時滴嘴放置之位置，以在作物根基為要，則不產生逕流及滴嘴之位置適當（受作物枝葉覆蓋），均可減少蒸發損失。

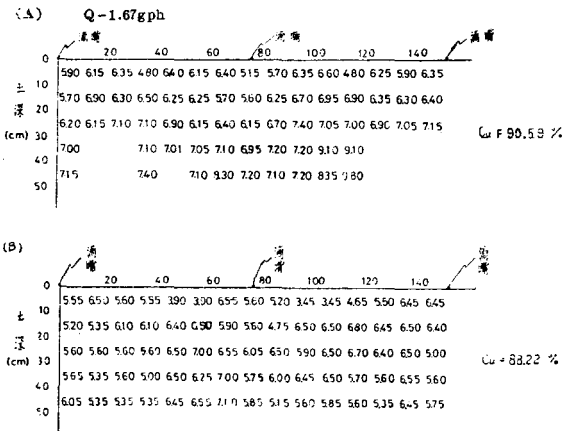
(2) 從第一次與第二次試驗之結果作比較，二者流量相同，但因土壤之處理方式不一，因之入滲之水分分佈情形不同。前者係不壓實之土壤水分分佈圖，後者係經壓實者，造成此種不同情形的原因與土壤顆粒排列之緊密度有關，因此影響孔隙度之大小與分佈之均一性。一般說來，土壤顆粒排列愈緊密，其孔隙愈小，反之則愈大，此種證明可由「理想土壤孔隙之特性」⁽¹³⁾ 解釋之。水流在土壤中流動速度的緩急及其流動的方向，端賴孔隙的分佈而定，所以孔隙是影響入滲情形的重要因素之一。後者處理方式，較接近田間土壤顆粒之排列，故資料以採用壓實土壤為佳。

(3) 從試驗之結果知，砂土與砂質壤土之浸潤面雖同為橢圓分佈，但以砂土入滲時水流受重力之影響甚大，因之其中心隨時間而下移。而砂壤土受毛管吸力之影響較顯著，故其中心固定保持在供水點 (Point Source)。因此砂土之滲水性，重力之影響應考慮。

(4) 從第二、三、四、五次試驗，顯示估計值在縱向分佈上與試驗值比較偏低，而橫向分佈則偏高，亦為重力影響所致，因水平方向之濕潤靠毛管力之作用，而砂土之孔隙較大，毛管力的作用不顯著。

(5) 砂丘地一般被認為生產力低的土地，但是由於水分及肥料可用人為的方式易於調節（此為滴水灌溉之特點），加之土壤本身有良好的排水性及通氣性，應用滴水灌溉可望成為高度生產力的農地。

(6) 根據 Briggs 和 Shantz 之觀點，當土壤濕度大於凋萎係數時，所增加之水分即可供植物利用。因此凋萎係數為有效水分之「下限」，至於有效水分之「上限」，一般均定為田間容水量 (Field Capa-



圖十七 滴水灌溉施灌 3 小時停水 4 小時後水分分佈情形

七、討論、應用與建議

(1) 滴水灌溉使用之流量，以不產生逕流（即其土壤之入滲率將達入滲容量）之情況下愈大愈佳。因從試驗之結果顯示，流量愈大橫向之水分分佈亦愈大。相對地，縱向分佈減少，如此可增加根域層之水分

city)。有此觀念，祇是為支配田間容水量的「力」而設，亦即是在灌溉上視土壤為蓄水庫 (Reservoir)，為求灌溉水之有效利用而設的「上限」。如果農業技術在土層中能使土壤保持高於田間容水量以上之水分，又能解決土壤通氣及根系呼吸作用之需要時，以保持較高之土壤濕度為宜，在此情形下，土壤水分對作物吸收無應力存在，而得最適之生長環境，因此將會提高產量。滴水灌溉之補給根域層水分是採機動性的，因此它可使土壤含水量，大部份時間維持在飽和含水量與田間容水量之間，如應用在砂土上，其通氣良好，所以滴水灌溉可以說能提高作物產量。

(7) 很多旱作物如蔬菜類，其根系之分佈近似橢圓形，而滴水灌溉土壤之滲水情形亦為橢圓，若將滴嘴排列在根基上，則土壤在灌溉後水分分佈整個根域，因此就灌溉效率而言，應稱適當。

(8) 由經驗公式知，決定流量 (Q) 與施灌時間 (t) 可求得橢圓之濕潤體。若能從實驗得知根域深度及作物需水量，當能決定一次灌溉水深，惟入滲受土壤始初含水量之影響不可忽略，本公式經試驗調整後將來可作現場灌溉之應用。

(9) 滴水灌溉水由滴嘴流入田間，係經由細小孔道流出，故其施灌水應做水質檢驗，得一使用之最低標準，藉以避免徵少固體堵塞管路。

(10) 支管上每個滴嘴流量大小不一可影響水分分佈之均勻度，為使用滴灌之缺點，將來應謀求改進。

(11) 首部 (Head) 接頭太多，易造成更多漏水的機會，亦應改進。

(12) 管路材料採用塑膠管，平舖於砂土上，受日曬之影響，水溫相當高，對於作物生理將會產生不良影響，因此一日中施灌時間之決定，有待考慮或埋於土中或可消除上述缺點。

(13) 圖十七為在田間使用流量 $Q=1.67\text{GPH}$ ，施灌 3 小時，停水 4 小時後，以 NIRIM METER 探測土壤水分分佈的情形，其均勻度 (Cu) 在 90.59% 及 88.22%，顯示出滴水灌溉之高效率。惟 NIRIM 為初次使用，未臻檢定工作，故該值只能作一比較數字。

八、參考文獻

- (1) D. GOLDBERG, and M. SHMUELI
"Drip Irrigation"
ASAE 1970 Vol, 31, No 1
- (2) VEN TE CHOW
Advances in Hydrosience
"Theory of Infiltration by J. R. Philip"
Vol. 5 p 217~220. Academic Press 1969
- (3) BODMAN G. B. and COLMAN E. A.

- "Moisture and Energy Conditions During Dounward Entry of Water Into soils" Soil Society of American Procedure Vol. 8 p 116~112 1943.
- (4) VAUGHN E. HANSEN
"Infiltration and Soil Water Movement During Irrigation" Sol Science. Vol. 79 No 2, Feb. 1955.
- (5) EAGLESON
"Dynamic Hydrology"
"Infiltration and Groundwater Flow"
Chapter 14 p267~282 New York, McGraw Hill, 1970
- (6) J. R. PHILIP
"The Theory of Infiltration"
Soil Science Vol. 83 p 345-357 1957.
- (7) TOKSOZ KIRKHAM and BOUMANN
"Two-Dimensional Infiltration and Wet-ting Fronts" ASCE Vol. 91 No IR 3, p4477 Sept. 1965.
- (8) 霍雨時
「二向度滲入率之分析」
農工學報 Vol, 16, No 1,2 民國59年6月
- (9) RICHARD H. F. PAO
"Fluid Mechanics" Charles E. Merrill Books, Inc. 1961
- (10) ARTHUR, G. HANSEN
"Fluid Mechanics. New York, Wiley, 1967
- (11) 劉佳明
驗式分析之基本定理
臺灣水利 Vol 18 No 2 民國59年6月
- (12) BRESLER, E., J. HELLER, N. DINER, I. BEN-ASHER, A. BRANDT and D. GOLDBERG.
"Infiltration from A Trickle Source"
Soil Science Society of American Procedure Vol 35 1971 p 675.
- (13) 徐玉標
灌溉土壤：土壤之孔隙度 科學農業 第18卷 5.6期 民國59年5月
- (14) 施嘉昌
烏山頭蓄水庫灌溉系統埤間灌溉方法試驗資料之研究分析報告
農工灌溉第十二號研究報告 民國58年3月
- (15) 施嘉昌
滲入率之觀測及其應用
農工學報 Vol 12, No 4. 民國55年12
- (16) 林俊男
灌溉壠溝入滲率之研究
農工研究所畢業論文 民國60年6月
- (17) 朱益
土壤滲水率及蔗田灌溉用水量之研究
農工學報 Vol, 13. No 3. 民國59年1月

九、誌謝

本文承恩師施嘉昌教授平日耳提面授，悉心教誨。及林俊男學長提供寶貴意見，始克完成，至深銘感五內。

草成之後，復蒙所主任張建勛教授與施清吉教授、劉佳明教授及研究所各位師長、同學之指正與鼓勵，謹此一併致謝。