

嘉南輪作田灌溉方法試驗之理論 分析及應用

The Theoretical Analysis and Applications on the Irrigation Experiments in Chia-Nan Area

臺灣大學農工系研究助理

葉政秀 吳純宏

一、引言

近年來，爲了配合水資源的開發和土地的利用，對於如何節省現有水源而加以更有效利用已隨着農業集約經營而更增加其重要性。嘉南農田水利會近年來一方面增加灌溉系統之內面工程，以節省每年因水路滲漏所浪費的水量，另一方面成立了學甲和新港兩個旱作灌溉試驗站，研究最經濟的輪作制度和最合理的營運計劃，以便在增加水稻種植面積之外，同時可以有充分的餘水有效地灌溉全區之雜作。過去數年中之試驗，蒙農復會經費的補助和臺大農工系之指導，已證明適量的灌溉可以使雜作增產。今後工作之重心在研究如何施行節水，能適時適量而均勻的灌溉於田間，以供將來大面積輪灌配水計劃之依據。田間灌溉方法的研究，受田間各種因素的錯綜影響很大，嘉南區域之自然環境，耕作條件和栽培方式與歐美各國及日本均有甚大的差異。因此，我們參考外國資料時必需先瞭解嘉南區域之灌溉環境。

二、嘉南區域農田灌溉之環境

本區雨量豐沛，年平均約在 1,500 公厘左右。惟分佈頗不均勻，約有 85~90% 集中降於 4~9 月，且大部份爲颱風所挾帶之豪雨，故此時全區之土壤均保持在濕潤狀態。10 月以後至翌年 3 月之雨量則不足 20%，且其連續乾旱日數有達 2~3 個月之久者；即本區需要灌溉之時期正相當於秋作之末期至春作之前期。

(一) 地面坡度

本區屬平原，區內灌溉系統計有烏山頭水源之南北幹線和濁水溪之濁幹線。以往數十年由於水源有限，區內除少數爲特殊水源補助區者外，均屬三年輪作田。此種長期與水稻輪作所形成的結果，使得本區的田面趨於平坦而無坡度。

(二) 田區長度

除少數小塊田坵外，本區的田區長度根據調查均在 100 公尺以上，且有長達 200 公尺者。同時在水稻收成後之整地，一般農民均犁毀隔區田埂，而增加田區的長度。

(三) 整地條件

由於以往從無雜作灌溉，故本區的耕犁設備尙未能配合旱作灌溉之需要，故整地後田面高低不齊，土塊亦大，因之粗糙係數增大。同時爲了增加栽植面積。農民每將水稻的補助水路犁毀，平栽作物則不習慣於作埂。

從灌溉的觀點，坡度甚小，田區過長再加上整地不理想均會減低水之前進速度，增加施灌水深，未能達經濟灌溉之原則。

(四) 入滲率

由於與水稻輪作的關係，本區土壤保水力甚佳，而水在此種土壤之入滲速度甚小，根據近年來之入滲率測定結果，本區的 n 值均在 0.5 以下，較低的 n 值有利於灌溉水在田間之分佈。

三、灌溉方法試驗實測記錄之分析

本區的灌溉方法均爲地面灌溉 (Surface irrigation)，且因區內作物栽培方式不同，灌溉方法以埂間灌溉 (Border irrigation) 和溝灌 (Furrow irrigation) 兩種爲主。前者施灌之作物計有花生、玉米、高粱及大豆等；而甘藷等畦栽作物則以後法施灌。本研究係針對埂間灌溉方法之理論分析及應用。

一種優良的施灌作業要能「適時適量」，與均勻分佈，如何才能「適量與均勻」即爲研究灌溉方法的主要課題。適量的灌溉除了控制地面水之水力因素之外，尙須考慮施灌後首末端均無水量不足之虞，亦即研究灌溉水在土壤中均勻分佈。水力因素的研究即在求得施灌效率 (application efficiency)，而水在

土壤中之分佈情形即所謂分佈效率 (Distribution efficiency)。本文所探討的即為嘉南輪作田，田間實際施灌記錄，其施灌效率及分佈效率之分析。

(一) 研究項目

1. 前進曲線 (Advance curve)

i) 流距與施灌時間之關係

將田間實際施灌記錄，點繪於雙對數座標紙上，可看出流距與施灌時間成直線關係，其相關係數 r 經統計結果均在 0.95 以上，故將灌溉記錄以最小二乘法 (Least Square) 分析所得的迴歸方程式 $t = KL^m$ (k, m 均為係數)，即所謂前進曲線 (Advance curve)。此一方程式為實測記錄之實驗式，且為各國研究灌溉方法之學者所公認。惟因 K, m 的係數並非定值，故應用此一曲線時，尚需加以適當的判斷。從以往分析的結果來看，同一土壤之 K, m 值依所施灌之單位流量 ($Q/W = q$)，灌前的入滲曲線以及整地情形而異。依水力學，水之流速與坡度之平方根成正比，可見前進曲線受坡度之影響最大。學甲試驗站之灌溉方法研究，目前正在調查和研究田間各種因子對前進曲線之影響程度，以便在充分而正確之試驗結果中，在某一範圍內估計 k, m 值，做為將來配水之依據。

ii) 流距與水脈前進速度之關係。

灌溉水在田面上，必受重力的影響而滲入土中，因此水流在田面為一不穩定之非等速流。其流速因流距之不同，隨時在減小，很難將水理因素藉用明渠的方法求得，僅能用實驗式加以探討。

如果前進曲線已知，將前進曲線 $t = KL^m$ 兩邊分別加以微分

$$\text{則 } dt = K \cdot m L^{m-1} \cdot dL$$

$$dL/dt = \frac{1}{K \cdot m} L^{1-m}$$

$$\therefore V = \frac{1}{K \cdot m} L^{1-m} = K_1 L^{-m_0}$$

式中 $k_1 = 1/K \cdot m$, $m_0 = m - 1$, v 即為水脈前進速度，以 (公尺/分) 計。

iii) 流距與施灌水深之關係

依水收支平衡來看，以一已知單位流量 q ，施灌 t 分鐘時之施灌水深

$$d = \frac{q \times t \times 60}{L}$$

上式中 $q: Q/W$ ($Q = l/sec$, $W: 埂寬或畦距m$)

t : 施灌時間 (分)

L : 施灌距離 (公尺)

d : 施灌水深 (公厘)

已知前進曲線 $t = KL^m$ 代入上式

$$\text{則 } d = \frac{q \times KL^m \times 60}{L} = 60qKL^{m-1} = K_2 L^{m_0}$$

上式中 $K_2 = 60Kq$ $m_0 = m - 1$

由施灌水深曲線，可見田區長度與施灌水深成正比

以上三種曲線在雙對數座標紙上均呈直線，故使用上甚為方便。惟以上之研究僅為灌溉水在地面上流動的情形，對於灌溉水在土壤中之分佈情形均未提及。要研究其分佈效率，必需先明瞭水在土層之滲入情形，即所謂入滲曲線。

2. 入滲曲線 (Intake rate curve)

有關入滲曲線之由來和演化已見於甚多的報告，故本文不再贅述。通常入滲水深曲線以 $D = CT^n$ 表示之，而入滲率曲線則為 $I = CnT^{n-1}$ 。其測定方法依田間實際施灌方法之不同而異。埂間灌溉及噴洒灌溉均以圓筒法 (cylinder method) 測定之。而溝灌則以流水法 (stream method or in-out flow method)，或水池法 (ponding method) 為宜。圓筒法之測定在本區試驗結果尚稱滿意。水池法則因受潤周影響，其測定結果之應用，甚多的細節尚待檢討。至於流水法，雖見於甚多的美國報告，在本區測定結果，發現田區極平坦無足夠落差可利用，因而有以下之情形：

(1) 出水端排水問題嚴重。

(2) 不同尺寸之量水設備 (parshall flume) 所得結果有異；且以不同流量施灌亦有不同。

(3) 溝中水位隨時上升，無一定值，致使出口所測之流量必需再以溝中之增加水量加以修正，否則無法準確地代表。

3. 前進曲線與入滲曲線之配合運用

從美國的報告，可以知道該國旱地均有坡度，且 n 值均在 0.5 左右，故灌溉時間均以入滲曲線來估計，而且一般均採用四分法；亦即由入滲曲線 $D = CT^n$ 換算欲補充水深所相當的 $\frac{1}{4}$ 入滲時間，即在該 $\frac{1}{4}$ 時間內所流達的距離即為最適流長。此時其貯藏效率為 100% 而深層之損失率則僅 5.6% ($n = 0.5$)。日本之旱地雖亦有坡度，但該國的 n 值均在 0.5 以上。且田區長度一般僅約 30~40 公尺，故另行採用“cut-back”法；即先以一適當流量灌至末端後，再另以較小流量續灌至欲補充水深為止。至於灌溉水浸入土壤以後之分佈情形，除了觀測前進曲線之外，同時觀測斷水後

，灌溉水順坡度退下的時間（首端斷水的時間即為其開始退水的時間。）同一距離該兩曲線之差數，即為該段之浸水時間，由入滲曲線算出該時間內之入滲水深，從而估計其效率甚為方便。本區之 n 值據調查均在 0.5 以下，從灌溉的觀點來看是一種優異的條件，惟因輪作田坡度甚小，灌溉水前進無落差可利用，且一般田區長度遠在 100 公尺以上，故施灌水深遠較需補充水深為高，亦即施灌效率甚低。（如以美國的四分法施灌，最適流長不會超過 20 公尺。）再者斷水後並無退水之情形，故退水曲線亦很難求得，因此本區的分佈效率以另法研究。尚須提及者，田間的因子複雜，如應用入滲曲線，需先假定土壤入滲曲線之均一性，一般均同時觀測 3~5 點之平均值來代表。

最近日本「農業土木研究」(Vol. 32, No. 6) 載有椎名乾治先生引用福田仁志教授所介紹之 Ostromecki 理論之分析方法，茲先介紹如下：

(1) Ostromecki 之理論

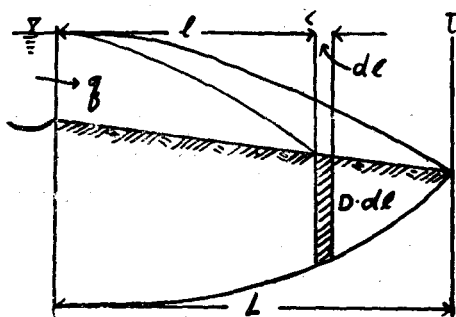


圖 1 灌溉水流標準圖

如圖-1，已知之單位流量 q ，流至 l 之時間為 τ ，達終點 L 之時間為 t ，前進曲線 $\tau = kl^m$ ，入滲水深曲線 $D = Ct^n$ (k, m, c, n 均為係數)。則 dl 距離內所浸入之水量（如圖-1 斜線部分所示）。

$$D \cdot dl = c (t - \tau)^n \cdot dl$$

積分之，則時間 t 時，全長 L 距離所浸入水量

$$p = \int_0^L C (t - \tau)^n \cdot dl \dots \dots \dots (1)$$

假定此時首端之田面水深為 y ，則依水收支平衡

$$q \cdot t = S \cdot y \cdot L + c \int_0^L (t - \tau)^n \cdot dl \dots \dots \dots (2)$$

式中 S 為灌溉水流型係數。

再將(2)中之第 2 項積分，則

$$C \int_0^L (t - \tau)^n \cdot dl = ct^n \int_0^L (1 - \tau/t)^n \cdot dl = \mu \cdot ct^n L \dots \dots \dots (3)$$

(3)式之 μ 稱為滲入水之均一指數 (uniformity

index)，與 L, t 及 n 值有關，依實驗紀錄分析的結果，Ostromecki 氏認為 μ 與 n 值有以下之關係：

n.	1.00	0.75	0.50	0.25
μ 之平均值	0.72	0.82	0.89	0.95

本區之 n 值即在 0.5 以下，則本區之 μ 值均在 0.9 以上。

(2) 椎名乾治先生更以前進曲線，進一步演化如下：

將前進曲線 $\tau = kl^m$ 代入(1)式，則

$$p = c \int_0^L (t - \tau)^n \cdot dl = ct^n \int_0^L (1 - \tau/t)^n \cdot dl = ct^n \int_0^L (1 - kl^m/t)^n \cdot dl \dots \dots \dots (4)$$

(4)式中 $(1 - kl^m/t)^n$ 為一無窮級數，

$$\because 1 > n > 0 \quad kl^m/t < 1 (\because \tau < t)$$

依二項式定理展開之，其第三項以下甚為微小可以忽略不計故(4)式可以再演化為

$$p = ct^n \int_0^L (1 - kl^m/t)^n dl = ct^n \int_0^L (1 - n \cdot \frac{kl^m}{t} + \dots \dots \dots) dl = ct^n (L - n \cdot \frac{k}{t} \cdot \frac{1}{m+1} L^{m+1}) \dots \dots \dots (5)$$

由(3)及(5)二式

$$\mu \cdot ct^n L = ct^n (L - \frac{nk}{t} \cdot \frac{1}{m+1} L^{m+1})$$

$$\therefore \mu = 1 - \frac{n}{m+1} \times \frac{KL^m}{t}$$

$$\therefore t = KL^m$$

$$\therefore \mu = 1 - n/m + 1 \dots \dots \dots (6)$$

則當 n, m 值已知時，即可求得 μ 值。故由(3)式即可很方便地求出斷水時，浸入土壤之總水量 $= \mu ct^n L$ 。此時 ct^n 為首端之浸入水深，而 μct^n 則為全區之平均入滲水深。

應用椎名先生所演化之 μ 值，筆者再進一步探討斷水時之分佈情形以及最終之各種效率，以探討合理而經濟之施灌水深。

(1) 斷水時之分佈效率

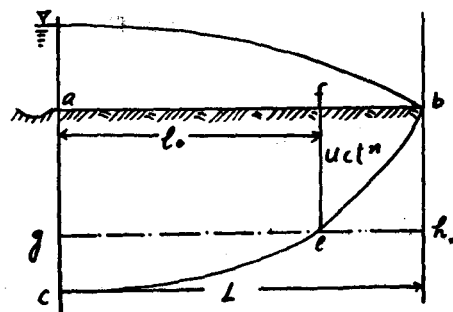


圖 2 斷水時灌溉水分佈情形

①由(3)式得浸入土壤之總水量為 $\mu ct^n L$ ，而平均入滲水深則為 μct^n

②假定f點之入滲水深為 μct^n 則由入滲曲線，當 $d = \mu ct^n$ 時查得入滲時間為 t_1 。則 t_1 即相當於由f流至b所需之時間故由a點流至f點之時間 $t_0 = t - t_1$ 。再由前進曲線得 $af = l_0$ 。

③令圖-2 $acef = p_0$

則(5)式

$$p_0 = c t^n \int_0^{l_0} (1 - n \cdot kl^m / t + \dots) dl$$

$$= ct^n \left(l_0 - \frac{n}{m+1} \cdot \frac{kl_0^{m+1}}{t} \right)$$

$$= ct^n l_0 \left(1 - \frac{n}{m+1} \cdot \frac{t_0}{t} \right) \dots \dots \dots (7)$$

即af段之均一指數

$$\mu_0 = 1 - (n/m+1) \cdot (t_0/t) \dots \dots \dots (8)$$

又 $\because t_0 = t - t_1 \quad \mu ct^n = ct_1^n$

$$\therefore t_0/t - t_1/t = 1 - \mu^{1/n}$$

故 $\mu_0 = 1 - (n/m+1) \cdot (1 - \mu^{1/n}) \dots \dots \dots (9)$

④又圖-2中，ef為平均入滲水深，故

$$ceg = beh = acef - agef$$

$$= \mu_0 ct^n l_0 - \mu ct^n l_0$$

$$= (\mu_0 - \mu) ct^n l_0$$

故ab段斷水時，土壤水分佈效率為

$$(E_a)_1 = 1 - \frac{2(\mu_0 - \mu) ct^n l_0}{\mu ct^n \cdot L} \dots \dots \dots (10)$$

$$\because t_0 = kl_0^m \quad t = KL^m$$

$$\therefore l_0/L = (t_0/t)^{1/m} = (1 - t_1/t)^{1/m} = (1 - \mu^{1/n})^{1/m}$$

故(10)可改寫為

$$(E_a)_1 = 1 - \frac{2(1 - (n/m+1) \cdot (1 - \mu^{1/n}) - \mu) ct^n \cdot l_0}{\mu \cdot ct^n \cdot L}$$

$$= 1 - \frac{2 \cdot (n/m+1) \cdot \mu^{1/n} (1 - \mu^{1/n})^{1/m}}{\mu}$$

$$(\because 1 - \frac{n}{m+1} = \mu)$$

$$= 1 - 2(n/m+1) \mu^{\frac{1}{n}-1} (1 - \mu^{1/n})^{1/m} \dots \dots \dots (11)$$

(11)式所求得之分佈效率，僅為斷水時之情形，此時首端之水位較末端為高，灌溉水必因兩端之水位差而向末端移動。同時因末端已浸水的時間恒少於首端，地面水在末端之入滲率較首端為大，由此所形成的水位差使地面水緩緩地流動。在坡度較平之區域，如灌到末端不再延長，則斷水後某一時間，地面水終將移動甚微而趨於水平。

(2)斷水後 t_1' 時之分佈效率

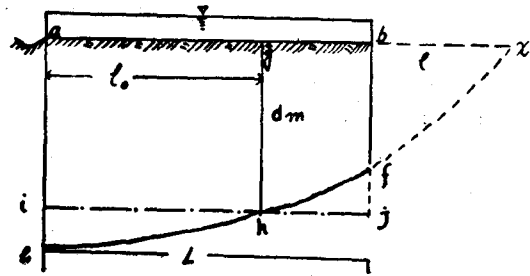


圖3 斷水後 t_1' 灌溉水分佈之情形

假定斷水後 t_1' ，地面水趨於水平，則在此 t_1' 內首末端之入滲水深分別為 ae 與 bf 。想像將 ef 以 μ 之均一度延長交 ab 於 n ，則 bx 即為假想灌溉水抵達 b 點時再繼續灌 t_1' 時間所能流達之距離。由圖-3及(7)式

$$abfe = c(t+t_1')^n L(1 - n/m+1) \cdot t/(t+t_1') \dots \dots (12)$$

則其平均入滲水深

$$d_m = c(t+t_1')^n \left[1 - \frac{n}{m+1} \frac{t}{t+t_1'} \right] \dots \dots \dots (13)$$

由入滲曲線，設入滲水深 d_m 之入滲時間為 t_2 ，則 $t_0' = t_1' + t - t_2$ ， t_0' 為由a流至g之施灌時間，再由前進曲線可得其流距為 l_0' 。故由(7)式得圖(3)之

$$aehg = c(t+t_1')^n l_0' \left(1 - \frac{t_0'}{t+t_1'} \cdot \frac{n}{m+1} \right) \dots \dots (14)$$

$\therefore ieh = fhj$

$$= aehg - aghi$$

$$= c(t+t_1')^n l_0' \left(1 - \frac{n}{m+1} \cdot \frac{t_0'}{t+t_1'} \right) - d_m \cdot l_0'$$

$$= c(t+t_1')^n \cdot l_0' \cdot \left(\frac{n}{m+1} \cdot \frac{t - t_0'}{t+t_1'} \right)$$

則其分佈效率

$$(E_a)_2 = 1 - \frac{2c(t+t_1')^n \cdot l_0' \cdot \left(\frac{n}{m+1} \cdot \frac{t - t_0'}{t+t_1'} \right)}{Lc(t+t_1')^n \left(1 - \frac{n}{m+1} \cdot \frac{t}{t+t_1'} \right)}$$

$$= 1 - \frac{2l_0' \left(\frac{n}{m+1} \times \frac{t - t_0'}{t+t_1'} \right)}{L \left(1 - \frac{n}{m+1} \cdot \frac{t}{t+t_1'} \right)} \dots \dots \dots (15)$$

尚須研究者，假定 t_n 為滿足需要補充灌溉水深 d_n 所需之浸水時間，即斷水後 t_n 分鐘末端之入滲水深為 d_n ，此時其平均入滲水深 d_m 與實際施灌水深 d_1 之間有以下三種可能之關係；

① $d_m = d_1$ ，此時其分佈效率等於(15)式，儲存效率100%，施灌效率 $(d_n/d_1 \times 100)\%$ ，此為最理想之灌溉。

② $d_m > d_1$ 表示施灌水量尚不够滿足末端根系所需，灌溉水量應再補充至 d_m ，其分佈效率亦等於(15)式，儲存效率 100%，施灌效率為 $(d_n/d_m \times 100)\%$ 。

③ $d_m < d_1$ 表示地面尚有積留水量，故實際入滲水量應再考慮殘留水量，假定將它平均分配各段，則其儲存效率為 100%，施灌效率 $(d_n/d_1 \times 100)\%$ 。而分佈效率則應修正如(16)式所示。

$$E_a = 1 - \frac{2l_0'c \cdot (t + t_1^0)^n \cdot \left(\frac{n}{m+1}\right) \left(\frac{t-t_0'}{t+t_1'}\right)}{d_1 \cdot L} \quad (16)$$

(二) 現地試驗資料之應用

55年10月，學甲試驗站在雲林縣元長鄉五塊厝地區做過一次灌溉試驗，茲將其實地觀測資料用以上的分析方法，分析如下：

1. 土壤質地：砂壤土
2. 種植作物：花生
3. 灌溉方法：埂間灌溉 (Border irrigation)
4. 試驗處理：
 - ① 流量：均為 21 l/sec。
 - ② 埂寬：5, 6, 7, 8m 四處理四重複。
 - ③ 田長：95m。

5. 試驗結果：限於篇幅，僅以 $Q/W = 4.2$ 者為代表分析如下：

- i) 入滲曲線 $D = 14.3T^{0.347}$ ，繪如圖 4
 - ii) 前進曲線 $T = 0.152L^{1.20}$
 - iii) 逕流率曲線 $\bar{V} = 5.5L^{-0.20}$
 - iv) 施灌水深曲線 $d = 38.2L^{0.20}$
- } 繪如圖 5

v) 均一指數 $\mu = 1 - \frac{n}{m+1} = 1 - \frac{0.347}{2.2} = 0.843$

圖 4. 元長灌前入滲曲線

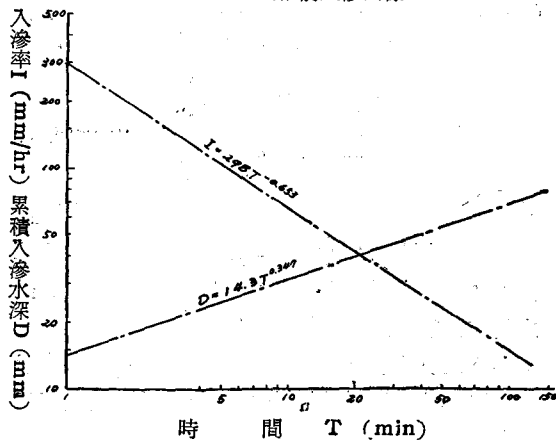
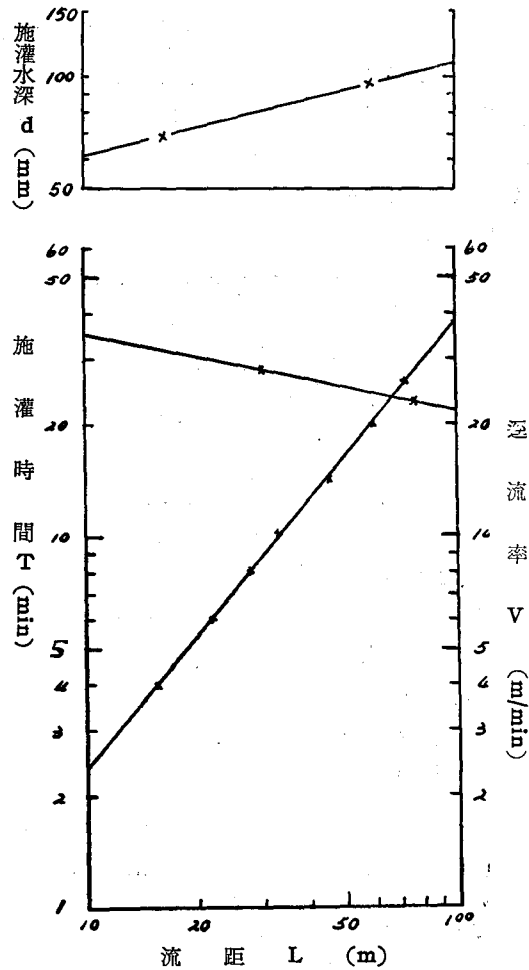


圖 5. 元長花生埂間灌溉試驗之前進曲線及施灌水深曲線



vi) 分佈效率：

① 斷水時

$$\begin{aligned} (E_a)_1 &= 1 - 2 \times \left(\frac{n}{m+1}\right) \cdot \mu^{\frac{1}{n}-1} \cdot (1 - \mu^{1/n})^{1/m} \\ &= 1 - 2 \times \frac{0.347}{2.2} \times 0.843^{1/0.347-1} (1 - 0.843^{1/0.347})^{1/1.2} \\ &= 1 - 0.316 \times 0.723 \times 0.324 \\ &= 0.926 = 92.6\% \end{aligned}$$

② 斷水後60分鐘

假定欲補充水深為 60mm，由圖查得其浸水時間為 60'，則斷水後 60 分鐘時，首端之入滲水深為 70mm，而平均入滲水深 $d_m = 70 \left(1 - \frac{0.347}{2.2} \times \frac{36.4}{96.4}\right) = 65.8\text{mm}$ ，由圖 4 查得其入滲時間

為78'，則 $t_0' = 36.4 + 60 - 78 = 18.4'$ ，再由圖-5查得 $l_0' = 54\text{m}$ ，由(15)式得

$$(E_a)_2 = 1 - \frac{2 \times l_0' \times \left(\frac{n}{m+1} \cdot \frac{t-t_0'}{t+t_1'} \right)}{L \left(1 - \frac{n}{m+1} \cdot \frac{t}{t+t_1'} \right)}$$

$$= 1 - \frac{2 \times 54 \times (0.158 \times 18/96.4)}{95 \times (1 - 0.158 \times 36.4/96.4)}$$

$$= 1 - \frac{108 \times 0.0296}{95 \times 0.641}$$

$$= 0.964 = 96.4\%$$

③由圖-5，當 $L=95$ 公尺時之施灌水深度， $d_1 = 95\text{mm}$ 即 $d_1 > d_m$ ，故斷水後60'地面尚有積留水量，假定斷水後90'水面移動甚微，而趨於水平，此時首端之

入滲水深為77mm，而平均入滲水深 $d_{m2} = 77 \left(1 - \frac{0.347}{2.2} \times \frac{36.4}{126.4} \right) = 73.5\text{mm}$ ，由圖4查得其入滲時間為110'，則 $t_0' = 36.4 + 90 - 110 = 16.4'$ ，再由圖-5查得 $l_0' = 50\text{m}$ ，由(16)式

$$E_a = 1 - \frac{2 \times l_0' \times \left(\frac{n}{m+1} \cdot \frac{t-t_0'}{t+t_1'} \right) \cdot c \cdot (t+t_1')^n}{d_1 \times L}$$

$$= 1 - \frac{2 \times 50 \times 0.158 \times \frac{36.4 - 16.4}{126.4} \times 77}{95 \times 95}$$

$$= 1 - 0.021$$

$$= 0.979 = 98\%$$

施灌效率 $E_n = 60/95 = 0.63 = 63\%$

表 (一) 各種處理之不同灌溉效率

Q/W	前進曲線	入滲曲線	均一指數 μ	公佈效率 (%)			施灌效率 (%)
				斷水時	斷水後60分鐘	最終	
4.2	$T=0.152L^{1.200}$	$D=14.3T^{0.847}$	0.842	92.6	96.4	98	63
3.5	$T=0.147L^{1.287}$	"	0.847	93.4	95.8	97.2	57
3.0	$T=0.130L^{1.327}$	"	0.851	94.1	95.6	97.1	57
2.625	$T=0.189L^{1.262}$	"	0.846	93.4	95.1	96.7	62

(vii) 理想灌溉之檢討

假設不同距離為末端斷水點，其土壤入滲水深變化情形計算如表(二)所示。

(表二) 不同距離為末端斷水點之土壤入滲水深變化表

(1) 流距(公尺)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95
(2) 到達時間(分)	2.4	5.5	9.1	12.6	16.7	20.7	25.0	29.0	33.6	36.4
(3) 施灌水深度(公厘)	60.5	69.5	75.5	80.0	83.5	86.5	89.5	92.0	94.0	95.0
(4) 斷水時土中已入滲平均水深(公厘)	16.0	21.7	26.0	28.8	32.0	34.5	37.0	38.8	41.0	42.5
(5) 末端滿足60mm時土中入滲平均水深(公厘)	60.0	60.5	61.0	61.5	62.0	63.0	64.0	65.0	65.5	65.8
(6) 地面積留水深(公厘)	0.5	9.0	14.5	18.5	21.5	23.5	25.5	27.0	28.5	29.2
(7) 理想灌溉時間(分)	2.4	4.8	7.4	9.7	12.4	15.1	17.9	20.5	23.5	25.0

「註」(4) = $\mu ct^n = 0.843 ct^n$ t 為到達時間

$$(5) = \left(1 - 0.157 \times \frac{t}{t+60} \right) \cdot c \cdot (t+60)^n$$

$$(6) = (3) - (5)$$

$$(7) = (5) / (3) \times (2)$$

由表(二)可以看出

①各段施灌水深度均較末端滿足60mm時土中之平均水深為高，故地面尚有積留水量，其最後屬於深層滲漏損失，是為一種灌溉損失。

②流距增長時，(5)欄之增加率較(3)欄為小，即地面積留水深亦隨流距之增加而增加。

③優良而合理的灌溉應使(3)欄正好等於(5)欄之水深，此時其施灌時間如(7)欄所示。以50公尺為例，如在

40公尺處即斷水，使餘水續流至50公尺，則施灌水深可以由83.5mm減少至62mm，即施灌效率高達97%，而分佈效率為98%，儲藏效率為100%。

④流距為95公尺時，依(7)欄假設其斷水點提早在70公尺，若可使之續流至95公尺，則施灌水深僅需65.8mm。惟因延長之流距若過長，斷水後即使可以流達末端，由於水流前進速率漸漸遲緩而滯留，前進時間與(1)欄不符合，則其入滲情形必與(5)欄有異。現地之試驗其斷水點為85公尺，施灌水深為83mm，經土壤採土烘乾法知其末端之入滲水深為70mm，故似可再提早為80公尺斷水然是否可在70公尺處斷水，則須在田間再進一步之試驗與探討。

四、摘 要

1. 灌溉時水脈之前進曲線可以 $t=KL^m$ 表示之，而施灌水深曲線則為 $d=K_0L_0^m$ ，式中 $m_0=m-1$ ， $k_0=k \cdot 60 \cdot Q/W$ ，受 Q/W 、入滲率、地面坡度、整地、作物等因子之影響。

2. 入滲曲線為 $D=CT^n$ ，其水流前進時，土壤已入滲之平均水深為 μct^n ，式中 $\mu=1-n/m+1$ ， μ 為水流前進時之均一指數。

3. 末端斷水時，其土壤入滲水量之分佈效率為 $(E_a)_1=1-2(n/m+1)\mu^{1/n-1}(1-\mu^{1/n})^{1/m}$

4. 斷水後 t_1' 分鐘，其土壤入滲水量之分佈效率為

$$(E_a)_2=1-\frac{2l_0' \cdot \left(\frac{n}{m+1} \times \frac{t-t_0'}{t+t_1'}\right)}{L\left(1-\frac{n}{n+1} \times \frac{t}{t+t_1'}\right)}$$

5. 斷水後 t_1' 分鐘，若田面尚有積留水量，則其最終之分佈效率為

$$E_0=1-\frac{2l_0' \times c(t+t_1')^n \left(\frac{n}{m+1}\right) \left(\frac{t-t_0'}{t+t_1'}\right)}{d_1 \times L}$$

6. 嘉南地域之田區坡度甚平，灌溉時土壤水分入滲曲線之 C 值大，故水流前進速度慢，施灌水深亦高。如果依照現行的一般灌溉方法，以田區末端為斷水點，則當根系深度內均已滿足所需之水深時，地面尚有積留水量，最終成爲深層滲漏損失。經多次不同地

區之試驗結果，發現若 Q/W 在3.5以上，大致可在灌溉水流達田區長度之80%處斷水。

7. 嘉南地域爲三年輪作田，底部有一不透水之牛蹄層，故本區之 n 值小於0.5，而分佈效率均在90%以上。

五、後 記 和 誌 謝

本文之計算公式乃循外國學者地面灌溉之理論，與筆者之意見加以演導。並經實地灌溉試驗之數據代入結果，證明本區施灌效率過低，而分佈效率則甚高。以往數十年，由於水源有限，本區大部份爲三年輪作田，故耕作制度和栽培方式均有其獨特之處。本區之田區坡度過小，灌距過長爲施灌水深太高之主要原因，與經濟使用本區灌溉用水的原則相違，故如何提高施灌效率，從而增加灌溉面積，實爲學甲試驗站之重任。惟因應旱作灌溉之需要，田間整地的工具和作物栽培方式以及將來之土地重劃均需與旱作之灌溉多方面配合。同時，田間因子至爲複雜，如何才能適量灌溉實非一兩次灌溉方法試驗即能解決，而需經多年的研究，資料之分析和累積，最後再加以適當的判斷才能確定的。

現地灌溉試驗，爲嘉南水利會會金億先生的籌劃，由學甲試驗站負責人黃卷重先生執行，本文之研究，承吾師張主任建勛教授、徐玉標副教授之悉心指導和鼓勵、施嘉昌副教授之指正；並蒙聯合國日籍旱作灌溉專家水之江政輝博士提供寶貴的經驗和資料，深爲誌謝。

參 考 文 獻

1. 嘉南學甲旱作灌溉研究試驗報告 張建勛、徐玉標
2. 旱田作物栽培方式與田間灌溉效率之研究 張建勛
3. 埤間灌溉方法之研討 吳純宏
4. 旱作灌溉效率之研究 黃金全
5. Method for Evaluating Irrigation Systems U. S. D. A
6. 灌溉分水論 福田仁志
7. 畑地灌溉方法決定因子之研究 水之江政輝
8. 埤間灌溉之設計理論及應用例 椎告小管