

輪作田灌溉方法之研究

Study on Irrigation Method in Paddy Rice and Upland Crops Rotation Field

臺灣大學農業工程學系講師

甘 俊 二

引 言

本論文係以輪作田灌溉為中心，現有之灌溉設施僅能適用於水田，如何改善灌溉設施與管理方法俾使水田與旱作田灌溉均能適用乃為本文研究的目的。

一般水田灌溉期間長流量小，灌溉方式為漫灌法，而旱作灌溉則以採用間斷灌溉方法為多，在短時間內需要大量之水，因此旱田灌溉需要之水路断面比之水田設計要大。

水田的灌溉只要將水量導入田埂內即能達到灌溉的目的，並不需要太高的水頭。至於旱田，大部份採畦灌或埂間灌溉法，故比水田需要較高水頭，且水田田面大致平坦，一旦輪植旱田灌溉則不像一般的純旱田灌溉地，沒有一定坡度可以提高灌溉效率。

所以輪作田在同一耕地輪流栽培水稻及旱作，其水路構造及灌溉方式必須以能適用於兩者之要求為標準。

在臺灣四季均可栽培作物，年平均達 2.5 作，如輪作田的代表地域嘉南平原，因水量不足，實施三年輪作制度，三年僅種植水稻一次，大都為旱田狀態利用。然該輪作田的水利設施係依照水田築造，以既設水路利用於旱作物灌溉實在是非常困難。

近年來臺灣水資源開發相當發達，要確保解決輪作田的旱作灌溉困難，必須尋求解決方法，改善輪作田現有的水利設施，從而對平坦地旱作灌溉方法及管理方法等加以研究。

I 輪作田的特性及其灌溉問題

(1)構成輪作田的原因：

輪作田是在同一田區，依照季節的不同，有時栽培旱作，有時栽培水稻，相互變換使用的土地利用方式。至於輪作田的灌溉仍以水田為主，田區的構造及水利設施均可謂專屬於水稻的栽培而設。

在經營方式上，受水源的限制，有時無法全區實施水稻的栽培，只能依據水源的給水量限制水稻的栽培面積，其餘的田區由於缺水不得不栽植旱作物。

如以嘉南地區的灌溉為例，目前的蓄水量（烏山頭水庫）雖可達一億三千萬噸，但是灌溉面積廣達八萬公頃，1公頃的給水量只僅及 187mm。同時蓄水庫的流入量變化，也從雨季的 40 C.M.S 到旱季的近乎零的流量。若要將烏山頭水庫灌溉系統內的 8 萬公頃全部當水田利用的話，既使將日用水量估計為 6 mm/day，而不計水路的損失時，最小流量也得在 56 C.M.S 才夠，也就是說目前水的絕對量尚感不足，所以不得不維持輪作制度。

(2)目前臺灣輪作田的灌溉方式

目前臺灣的灌溉事業可以說是以水稻為主要的對象，至於其他的旱作物，除了一部分特種作物如甘蔗外，均未能被考慮灌溉。同時甘蔗的灌溉，也只能是配合水稻灌溉的補助性之灌溉，並不能以甘蔗的需水期，加以及時及量的灌溉，也就是說目前臺灣的旱作灌溉尚無一定的方針。

在此，將臺灣輪作田灌溉問題的特性加以說明。

A) 水路：一般農田給水路的建設，均以水稻的浸水灌溉為對象，所以需要水頭 (head) 較低，因此利用於畦溝及埂間的地表灌溉時，往往引起 back water，很難維持田區定流量的灌溉。同時單位面積的流量是以水田用水量為根據，所以灌溉時間較長流量較小，水路的容量也設計得小。但是，旱作物的灌溉是在短期間實施較多量的灌溉，所以既存水田用給水路的容量將無法容納旱作物的灌溉水量。另外，稻作的灌溉，若採取續灌法時，可以越田灌溉，而不需要每一區塊設置水路系統，但是利用既存的水田用水路實施旱作灌溉時，因無法越田灌溉，所以實施上有困難。

B) 輪作田的區塊：輪作田區塊的特徵，不論是重劃後或是未重劃區，一般均呈長方形，長邊往往達 100 m 以上，這對耕作時耕耘機及耕牛的方向轉換次數可以減少，也就是說可以提高耕作效率。但是，灌溉方面，稻作是採用浸水式的灌溉，所以呈長方形的區塊也可順利實施灌溉。但是在此等條件下，實

施旱作灌溉，將發生種種的困難。以下試以日本的相模原的旱作灌溉計劃的區塊標準與嘉南地域的輪作田的區塊作一比較：

嘉南的輪作田（未重劃）

（短邊）25~50m×（長邊）100m 以上

（水路設置於短邊）

日本相模原的旱田

（短邊）18m ×（長邊）54m

（水路設置在長邊）

臺灣的畦溝以及埂間地表灌溉，水流前進時間較長，相對時間的滲透水量也將增多，所以畦長愈長其灌溉效率愈差。也就是說對 100 m 以上的畦長，採用 Furrow 或 Border 法去灌溉，將難獲得較高的效率。

C) 旱作灌溉的適用性：輪作田是稻作及早作交替種植的栽培方式，為了水稻的栽培，耕地的表面可以說是沒有坡度。但是目前一般使用的旱作灌溉，均係在有坡度的條件下所導出者，因此無法使用於無坡度的平坦地，例如以美國農工手冊中應用之公式為：

$$Q = \frac{10}{S} \dots\dots\dots(1)$$

$$L = \frac{1000}{(I-A) WS} \dots\dots\dots(2)$$

Q：單位畦溝的最大流量（加侖/分）

S：畦溝流向的坡度（%）

I：灌溉前的降雨強度（in/hr）

A：土壤的滲透率（in/hr）

W：畦寬（ft）

L：畦長（ft）

所以(1)及(2)式均無法使用於無坡度的輪作田。對於旱作物的灌溉為了要提高灌溉效率，對於單純的旱作田，均可整成一定的坡度以提高灌溉效率，但如輪作田，受了稻作必須維持無坡度，故對於旱作物的灌溉則將考慮無坡度的條件下，導出適宜的灌溉式是必要的。

D) 作物種類與灌溉問題：臺灣因氣候溫暖，全年可栽植作物，一年可達2.5~3作。但是依作物種類的不同，耕作方式也有相當的差異，例如甘藷、甘蔗的畦溝灌溉，落花生、大豆的埂間，玉米的細溝灌溉，灌溉方法也各有不同，一般輪作田因同一作物的連作是不利的，所以栽培作物的變動是不可避免的。同時，除了水田之外，其他的旱作灌溉尚無一定標準，所以在灌溉實施上，對於參雜不齊的作物，相當困難。

E) 灌溉機械化的問題：對於噴洒灌溉方法的採用，由於作物種類多，同時株高相差懸殊，如甘藷、大豆等矮莖作物只不過 0.2~0.6 m，而黃麻、甘蔗等高莖作物，可高達 2.5~4 m，尤其是同一作物很少連作，所以一般固定型的噴洒灌溉裝置的使用受了限制。又作物的生長期短，耕作回數較多，在田區設置半固定型的灌溉用水管亦有困難。

另一方面，對於動力機械的購買能力，現階段的臺灣農民負擔也較重。以米為基準而加以比較，購入同一機械，臺灣須比日本多負擔約 2.5~3.0 倍的代價。但是以日本的實例來看，噴洒灌溉只能使用於收益較高的一小部分經濟作物，如柑桔才能合算，而對於一般的旱作物目前尚難使用。所以就目前臺灣的輪作田的旱作灌溉而言，如果要全面依賴噴洒灌溉的話，在投資效益上亦有問題。

(3)輪作田灌溉的展望

如日本的農業，一年一作水稻，再加上裏作勉強可以說是二年二作。對於水田及旱田的區分極為明顯，水田有水田專用的給水路，至於旱田部分，依照經濟上的效益，一部分可考慮使用噴洒灌溉。如相模原及愛知用水的旱作灌溉計劃中，設置有旱田專用的 U 字管水路及管水路，但這只限於一小部分，大部分的旱田均未考慮灌溉。

至於臺灣旱作物的大部分是指水田區塊內的早期輪作而言，也就是說受了氣候上有利的條件，一年四季均可以栽植作物，稻作之後，因水源不足而無法種植水稻時，均栽培其他的旱作物。不過目前對於此等的旱作灌溉尚無完善的灌溉設施及實施的標準。

至於水路的利用狀態，例如嘉南烏山頭水系的三年一作地區，田區的灌溉，三年之中，僅僅只灌溉四個月，剩餘的二年八個月可以說是看天田的狀態。所以末端小給水路的通水利用率僅 11%，比起一般兩期作田的水路利用率 67%，是非常不經濟的，特別是這種水路構造只能顧及水田的配水，用之於旱作物的灌溉尚有種種困難，所以今後水路的改善是必要的。

現在臺灣嘉南地區正在進行的水源開發有如下三點：

1) 水稻的輪流灌溉

2) 土水路的內面工

3) 水庫的興建—曾文水庫

就水稻的輪流灌溉而言，稻作的用水量約可節省 25~50%，所節餘的水可增加水稻的栽培面積。另一方面土水路的內面工，每年約可減少一億四百萬噸

的水路損失。此外如興建中的曾文水庫的八億九千萬噸水，對新水源的增加已無問題。

但是今後必須研討新的配水對策才能使整個嘉南地域的灌溉實施不致紛亂。要使臺灣輪作田的灌溉，全面實施的話，下列諸問題，必須解決。

a) 區塊內的灌溉，不論是水稻或旱作，均能正確的量水，特別是對於旱作物，必須求出適合平坦地的灌溉方法才行。

b) 水路的構造，必須兼顧水稻及旱作的灌溉，均能正確供給所需要的水量，特別是旱作灌溉時，所需要的水頭，必須設法獲得。

c) 至於配水計劃，由於水田及旱田的灌溉將同時舉行，所以為了全體配水不致混亂起見，不論水田或旱田，均能在分水工 (check gate) 接收定時定量的水，作各輪區中分別得以適當的分配及灌溉。

II 田間灌溉方法的研究

田間的灌溉，若是水田的話，則由水口導入水田，使得田面保持浸水狀態，即能達到灌溉的目的。而且水田的土壤是長期處於浸水，其滲透率 (Intake Rate) 已達穩定的狀態，也就是說水稻的田間需水量可由蒸發散量加上土壤滲透量而獲得。至於灌溉時所使用的流量也可以較小。同時在灌溉操作上，以區塊為單位，導入水量即可。

另一方面，旱作物灌溉，由於作物種類、耕作方法、灌溉水深以及土壤滲透率等種種因素的影響，灌溉效率差異極大。所以為了確保一定的灌溉效率，必須要設法定出適當的畦長以利灌溉的實施。輪作田的灌溉是由水稻及旱作交替栽培，所以同一般的純旱作田的灌溉方式有相當的差異。例如旱作田的灌溉耕地均有適當的坡度，以利水足的前進，因而可以提高灌溉效率。但是這種方式在輪作田無法利用。又一般的旱作灌溉公式也無法適用。所以必須以輪作田的特性，探求合理的灌溉式是很重要的。

為了誘導輪作田的灌溉式之前，先將影響土壤滲透率及水足的前進之有關特性，個別加以討論：

(1) 滲透量與水足的性質

(A) 田間土壤的滲透率

旱田的浸透量同一般水田已達安定狀態的浸透量 (Basic intake Rate) 不同，是隨著灌溉時間而變化的。至於旱田的滲透量是受土壤表面的覆蓋、土壤的性質、構造、含水比、灌溉水的濁度、水温、地温

等的因子而異。一般土壤通常在灌溉開始後，其滲透量較大，但是經過一段時間以後，可以趨近一定的穩定量。若將此現象用指數曲線來表示：

$$I = I_0 + (I_0 - I_c) e^{-K \cdot T} \dots\dots\dots(3)$$

I ：在 T 時間的浸入速度 (mm/min)

I_0 ：初期最大滲透速度 (mm/min)

I_c ：滲透量安定以後的滲透速度 (mm/min)

T ：經過時間 (min)

K ：常數

上式是 Horton 式用來表示降雨滲透率的曲線式。但是實際上的計算相當煩雜，應用在旱作灌溉上相當不便，所以利用雙曲線近似式來簡化算式的計算。

$$D = KT^n \dots\dots\dots(4)$$

D ：灌溉後 T 分鐘時的累積滲透量 (mm)

T ：灌溉開始後的經過時間 (min)

K, n ：常數

滲透率的測定法，目前在臺灣被採用的有三種方法：

a) 圓筒測定法 (Cylinder Method)

b) 畦溝測定法 (Furrow Method)

c) 流出流入法 (Inflow Outflow Method)

其中 Cylinder 法使用於噴洒灌溉及田埂間灌溉的滲透量之測定。Furrow 法則使用於畦溝的灌溉。另一方面，Inflow-Outflow 法的測定，因初期的變化無法精確地獲得，再加上須要消耗多量的用水及較廣的測定面積，所以應用上不太方便。故本研究採用的測定方法，畦溝灌溉用 Furrow Method，田埂間灌溉用 Cylinder 法。Furrow 法測定之滲透式應用於灌溉時，由畦寬及通水寬的關係，必須修正滲透常數。

$$D_f = \frac{b}{B} KT^n = K'T^n \dots\dots\dots(5)$$

D_f ：畦間滲透量 (m.m)

B ：畦寬 (m)

b ：通水寬 (m)

K, K', n ：由實驗式求出的 Intake 定數

為了旱作物的灌溉，如何去決定適當的畦長，滲透量變化的測定是很重要的因素。

(B) 畦溝灌溉水的前進速率

一般地表灌溉均以靠重力作用的灌溉為主。所以水足前進速度的時間變化是很重要的因素。田區的灌溉若坡度一定的話，畦溝的前進速率之性質，有如下的關係：

i) 定長的畦溝，若增加流量的話，水足的到達時間會縮短。

ii) 流量及坡度一定，而增加畦長的話，水足的到達時間會遲延。這個現象用實驗式表示：

$$t = \alpha L^\beta \dots\dots\dots (6)$$

t : 到L為止所需要的時間 (min)

L : 水足的流距 (m)

α, β : 常數

這種情形，用雙對數圖將流距 (L) 與時間 (t) 的關係點出，則大致可成直線。

另一方面，若改變流量的話，常數 α、β 也隨著改變。也就是說隨著流量的增大，α、β 有減少的趨勢。至於水足的前進，時間與畦長成正比，亦流量成反比。

在此，若將水足的前進時間 (t)、流量 (Q) 及畦長 (L)，三者的關係用最小二乘法歸納的話，可以用(7)式表示：

$$t = aL^bQ^c \dots\dots\dots (7)$$

t : 到L為止的時間 (min)

L : 水足的流距 (m)

Q : 畦溝的灌溉流量 (l/sec)

a, b, c : 常數 (但是 a, b > 0; c < 0)

(C) 實驗

此項實驗是在臺南學甲地域的輪作田實施。時間是十月末 (稻作後的空白田)。畦溝的整地方法是採用一般農家的耕作方式，在實驗前五日，經由牛工犁成 100 m 長的甘蔗栽培用畦溝。

土壤的物理性質如下表所示：

表 1：

粒 徑 分 析				水 分 當 量 %	凋 萎 點 %	假 比 重
砂 粒 (%)	坩 粒 (%)	粘 粒 (%)	土壤質地			
16.0	59.0	25.0	壤 土	22.67	6.99	1.44

a) 滲透量的測定：此項實驗以甘蔗的畦溝灌溉為對象，利用 Furrow Method 來測定滲透量，實驗 data 如表(2)。時間與滲透量的關係用(8)式來求常數 k, n。

$$\begin{cases} \sum \log D = N \log K + n \sum \log t \\ \sum (\log D \log t) = (\log K) \sum \log t \\ + n \sum \log t^2 \dots\dots\dots (8) \end{cases}$$

表 2：

時 間 (分)			浸 入 量 (mm)		
t	logt	logt ²	D	logD	logD logt
1	0.00	0.00	1.89	0.28	0.00
2	0.30	0.09	3.60	0.56	0.17
3	0.48	0.23	5.48	0.74	0.31
5	0.70	0.49	8.56	0.93	0.65
10	1.00	1.00	16.07	1.21	1.21
15	1.18	1.40	22.22	1.35	1.59
22	1.34	1.80	29.40	1.47	1.97
30	1.48	2.20	35.21	1.55	2.30
45	1.65	2.73	42.56	1.63	2.69
60	1.78	3.16	47.51	1.68	2.99
80	1.90	3.60	51.61	1.71	3.25
100	2.00	4.00	55.54	1.75	3.50
140	2.15	4.63	63.40	1.80	3.87

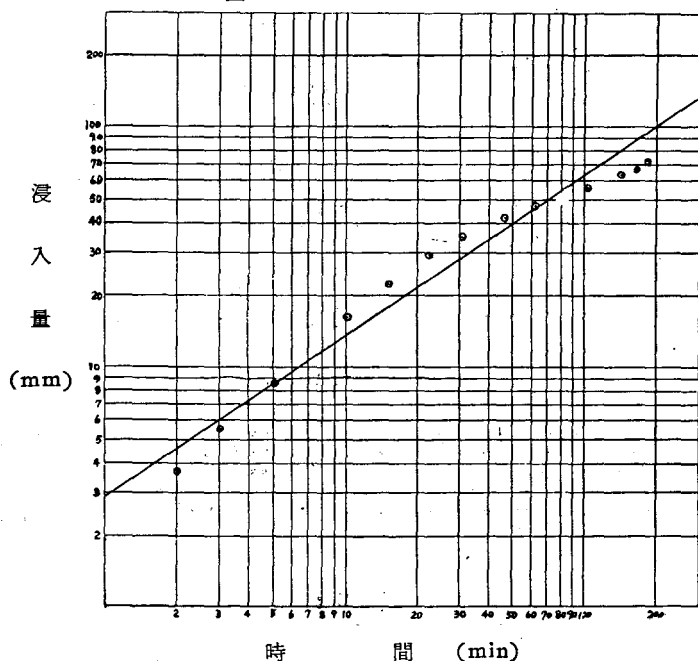
160	2.21	4.89	66.82	1.82	4.02
180	2.26	5.10	70.24	1.85	4.18
Σ	20.43	35.32	Σ	20.33	32.69

$$\begin{cases} 15.00 \log a + 20.43 b = 20.33 \\ 20.43 \log a + 35.32 b = 32.69 \end{cases}$$

其滲透為 $D = 2.89 t^{0.66}$

若用雙對數圖表示的話，如圖(1)。

圖 1 $D = 2.89 t^{0.66}$



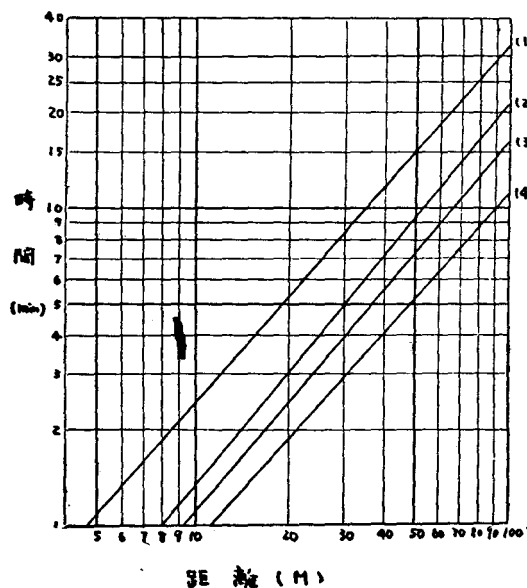
b) 水足的特性實驗是利用不同的流量，在不同的畦溝，求出每 5 m 的流過時間，其測定結果如表(3)。

表 3

畦長 (m)	流量 (l/sec)	1.3	2.6	4.3	7.6
5		1.1	0.5	0.5	0.5
10		2.7	1.3	1.2	0.9
15		3.9	2.2	1.8	1.4
20		5.8	3.0	2.4	1.9
25		7.1	3.9	3.0	2.4
30		8.5	5.1	3.7	2.9
35		9.7	6.2	4.5	3.4
40		11.2	7.1	5.4	3.9
45		13.0	7.9	6.2	4.5
50		14.7	9.2	6.9	5.2
55		16.6	10.4	8.4	5.9

50	18.7	11.5	9.3	6.4
65	20.6	13.1	10.2	7.2
70	22.6	14.1	11.4	7.8
75	25.0	15.0	12.2	8.4
80	27.1	16.1	13.1	9.1
85	29.2	17.3	14.4	9.8
90	31.5	18.8	15.6	10.5
95	34.0	20.1	16.6	11.1
100	35.5	21.4	17.0	11.8

若將此數值，以各流量的水足前進速率，以最小二乘法求出 α 、 β 。(圖2)



No:	流量 (l/sec)	流下式
(1)	1.3	$t = 0.239 L^{1.07}$
(2)	2.6	$t = 0.082 L^{1.21}$
(3)	4.3	$t = 0.073 L^{1.17}$
(4)	7.6	$t = 0.067 L^{1.13}$

圖 2

若要再加上流量的變化，將時間、距離、流量三者的關係式用最小二乘法(9)式來計算：

$$\begin{cases} \sum (\log t) = N \log a + b \sum \log L + c \sum \log Q \\ \sum (\log t \cdot \log L) = \log a (\sum \log L) + b \sum \log L^2 + c \sum (\log L \cdot \log Q) \\ \sum (\log t \cdot \log Q) = \log a (\sum \log Q) + b \sum (\log L \cdot \log Q) + c \sum \log Q^2 \end{cases} \quad (9)$$

先將表(3)的 data 取對數值，列表如表(4)

表 4

$\log Q$ $\log L$	0.11	0.42	0.63	0.88
0.699	0.041	0.300	0.300	0.300
1.000	0.432	0.114	0.079	0.050
1.178	0.591	0.343	0.256	0.146
1.300	0.764	0.477	0.380	0.279
1.400	0.851	0.591	0.477	0.380
1.478	0.930	0.708	0.569	0.463
1.545	0.986	0.792	0.654	0.531
1.601	1.050	0.851	0.732	0.591
1.652	1.114	0.897	0.792	0.654
1.700	1.169	0.964	0.839	0.716
1.741	1.220	1.018	0.925	0.771
1.780	1.271	1.061	0.969	0.806
1.815	1.315	1.119	1.009	0.858
1.845	1.355	1.150	1.058	0.892
1.875	1.399	1.177	1.087	0.924
1.903	1.432	1.208	1.119	0.959
1.930	1.465	1.239	1.159	0.991
1.955	1.499	1.274	1.192	0.021
1.980	1.531	1.305	1.220	0.045
2.000	1.550	1.330	1.230	0.071
32.377	22.335	17.318	15.446	12.748

則由表(4)的數值計算得

$$t = 0.1775 L^{1.17} Q^{-0.591} \quad (10)$$

(2)灌溉水深與效率的關係

旱作物的灌溉，主要是補給作物的吸水根系為目的。一般可由假定的根系深度來決定給水量。其計算的方法如(11)式。

$$d = \frac{P_{ac} \cdot A_s \cdot D}{100} \quad (11)$$

d ：灌溉水深 (mm)

P_{ac} ：土壤水分的增加率 (%)

A_s ：土壤假比重

D：根系的深度 (mm)

旱作物的有效根系以作物的不同，而有相當的差異。例如淺根作物的陸稻、花生、大豆等約為30~40 cm，深根作物如甘蔗、玉米約為 60~80 cm，所以隨著作物別，其灌溉水深也不同。

對於旱作灌溉，假定畦溝全部同時能均一地給水的話，畦溝的先端、中央及末端的水分均能一致。但是實際上的灌溉，除了噴洒灌溉之外，一般畦溝及田埂間的灌溉，均由畦的先端供給水量，再沿著重力流下，順次地濕潤土壤。至於畦溝的土壤在灌溉浸水時，可以說是水量浸入土壤的時間。所以土壤水分的吸收量，以愈靠畦首愈大。畦溝首末的差異愈小，土壤中的水分分佈，愈顯均勻，灌溉效率也愈好。

旱作灌溉效率的定義，在畦溝法及田埂間法時，可以分成二種型態來說明：

1) 水適用效率：(Water Application Efficiency)：灌溉總水量與有效土層的吸收量之比。(圖3)。

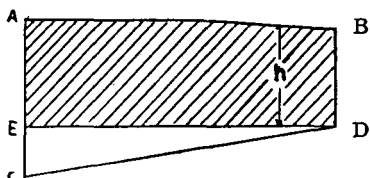


圖 3

$$E_a = 100 \times \frac{W_s}{W_f} \dots\dots\dots (12)$$

E_a ：水適用效率 (%)

W_s ：灌溉中根系層所保持的水量，實際上可用圖(3)的斜線之中所保持的水量。若末端超過有效根系 h (mm) 以上時，只有 A B D E 的面積才算有效水量

W_f ：全灌溉水量

一般在水源豐富的地區，能充分地供給作物的用水量時，可採用此法。但是灌溉用水量會比作物的實際用水量多。

2) 限制灌溉效率：此種效率是在水不足時，為了避免浪費將所有的水量均屬為有效水量，亦即灌溉水深的上限定為根群域的深度。至於灌溉水量的分佈損失由不足之分來計算。圖(4)

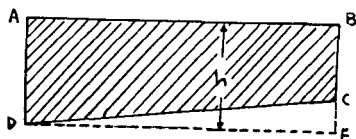


圖 4

$$E_s = 100 \times \frac{W_i}{W_n} \dots\dots\dots (13)$$

E_s ：限制灌溉效率 (%)

W_n ：有效根系層的需要灌溉量

W_i ：畦首的灌溉水深為 h (mm)，或是比此小的灌溉浸潤分佈面積。

在此將滲透量及水足的流下時間的性質代入上述的灌溉效率來看。

從水足的流下時間 (T_o) 與土壤的滲透時間 (T) 的首末畦溝的浸入量的差異時間將在 $0-T_o$ 之間，所以流下距離 (L) 的水量斷面分佈如圖(5)。

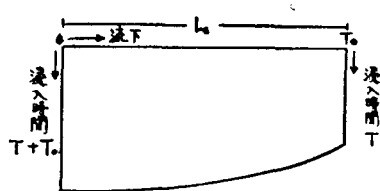


圖 5

在旱水輪作的田區，為了稻作的浸水灌溉，田面可以視為平坦。因此，同一田區的旱作灌溉，水足通達畦末後，地表的殘留水將呈均一的平衡狀態。灌溉後並無從畦首慢慢往畦末發生退水的現象。

灌溉後土壤水分的分佈計算 [參照圖(7)]。

i) 畦溝末端的浸入水量為 D_L ，則其浸入式為

$$D_L = C T^n \dots\dots\dots (14)$$

ii) T_o 為水足從畦首流至畦末的時間，則畦首的浸入式為：

$$D_o = C (T + T_o)^n$$

iii) 畦長 (L) 之間，任一點的浸入水深為：

$$D_x = C (T + T_o - T_x)^n \dots\dots\dots (15)$$

但是 ($0 < T_x < T_o$)

若將流達 X 點時的時間用 (T_x) 表示，則其流下式為：

$$T_x = \alpha X^\beta \dots\dots\dots (16)$$

將(16)式代入(15)式：

$$D_x = C (T + T_o - \alpha X^\beta)^n$$

再將上式從0積分到 L ，則畦長 L 的全浸入量 (A) 為：

$$\begin{aligned} A &= \int_0^L D_x dx \\ &= \int_0^L C (T + T_o - \alpha X^\beta)^n dx \end{aligned}$$

假設 $T + T_o = t_L$

$$\text{則 } A = C \int_0^L (t_L - \alpha X^\beta)^n dx \dots\dots\dots (17)$$

(17)式的積分之解，實難直接解出，所以爲了求其近似值，將 $(t_L - \alpha X^\beta)^n$ 項，用二項式定理加以展開，在適當的項數加以捨去。故對 X ， $X^{2\beta}$ ， $X^{3\beta}$ 等項必須設法使之收斂。在此若將 100m 做爲一單位，則(17)式可以用(18)式來代表。

$$\begin{aligned} A &= C \int_0^L [t_L - \alpha (100X)^\beta]^n dx \\ &= C \int_0^L [t_L - n\alpha (100X)^\beta t_L^{n-1} \\ &\quad + \frac{n(n-1)}{2} \alpha^2 (100X)^{2\beta} t_L^{n-2} - \dots] \\ &= C [t_L^n \cdot L - 100^\beta \cdot n\alpha t_L^{n-1} \frac{L^{\beta+1}}{\beta+1} \\ &\quad + \frac{n(n-1)}{2} \cdot 100^{2\beta} \alpha^2 t_L^{n-2} \frac{L^{2\beta+1}}{2\beta+1} - \dots] \dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

若將從實驗獲得的滲透式及流下式的定數 C ， n ， α ， β 及灌溉水深 (d)，及畦長 (L) 代入(18)式，求出各項數值：

根據前項實驗，各定數： $C = 4.42$ ， $n = 0.57$ ， $\alpha = 0.0843$ ， $\beta = 1.514$ ，灌溉水深爲 30mm，畦長爲 50m。

$$\begin{aligned} t_L &= T + T_0 = \left(\frac{d}{C}\right)^{\frac{1}{n}} + \alpha L^\beta \\ &= 6.78^{1.65} + 0.0843 \times 371 = 36.2 \text{ (min)} \end{aligned}$$

第一項：

$$t_L^n \cdot L - 36.2^{0.57} \times 0.5 = 7.75 \times 0.5 = 3.88$$

第二項：

$$\begin{aligned} &100^\beta \cdot n \cdot \alpha \cdot t_L^{n-1} \cdot \frac{L^{\beta+1}}{\beta+1} \\ &= 100^{1.514} \times 0.57 \times 0.0843 \times 36.2^{-0.43} \\ &\quad \times 0.5^{2.514} \times 2.514^{-1} \\ &= 1.465 t_L^{0.43} = 0.312 \end{aligned}$$

第三項：

$$\begin{aligned} &\frac{n(n-1)}{2} \cdot 100^{2\beta} \cdot \alpha^2 t_L^{n-2} \frac{L^{2\beta+1}}{2\beta+1} \\ &= \frac{-0.57 \times 0.43}{2} \times 100^{3.028} \times 0.0843^2 t_L^{-1.43} \\ &\quad \times \frac{0.5^{4.028}}{4.028} \\ &= -2.61 t_L^{-1.43} = -0.0158 \end{aligned}$$

從上例，第三項的數值尙在第二項的 $\frac{1}{20}$ 以下，一般的灌溉均在如例中所提的 30mm 以上，而達二倍的 60mm，所以第三項的數值尙不及第二項的 $\frac{1}{100}$ 以下，故可不計。其浸入量 (A)

$$\begin{aligned} A &= C [t_L^n \cdot L - \frac{100^\beta n \alpha t_L^{n-1}}{\beta+1} \cdot L^{\beta+1}] \\ &= 4.42 [3.88 - 0.31] \\ &= 15.78 \dots\dots\dots (19) \end{aligned}$$

若將畦長 (L) 之間的浸潤線，假定爲直線，將畦首與畦末的浸入水深來計算浸入量，則

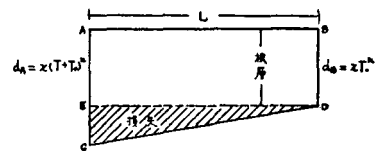
$$\begin{aligned} A &= \frac{CL}{2} [(T + T_0)^n + T^n] \\ &= \frac{4.42}{2} \times 0.5 \times [36.2^{0.57} + 23.5^{0.57}] \\ &= 15.25 \dots\dots\dots (20) \end{aligned}$$

一般灌溉效率的計算，例如美國的四分法，是將首末兩端之間的浸入水深視爲直線。來求平均浸入量。所以實用上，對田區灌溉式的計算使用近似值，並無多大的差異。

(3) 新灌溉式的誘導

1) 畦長的決定法：

a) 灌溉效率採用水適用效率時，圖(6)。



(圖 6)

灌溉效率 (E) 與滲透率的關係，圖(6)。

$$\begin{aligned} E &= \frac{\text{面積 } ABDE}{\text{面積 } ABDC} \\ &= \frac{XT^n \cdot L}{\frac{1}{2} [X(T + T_0)^n + XT^n]} \\ &= \frac{2T^n}{(T + T_0)^n + T^n} \dots\dots\dots (21) \end{aligned}$$

E ：水適用灌溉效率 (%) / 100

T_0 ：水足的前進時間 (min)

T ：對灌溉水深的浸入時間 (min)

X, n ：滲透定數

將 (21) 式加以整理，則

$$\begin{aligned} E(T_0 + T)^n + E \cdot T^n &= 2T^n \\ \frac{(T + T_0)^n}{T^n} &= \frac{2 - E}{E} \end{aligned}$$

$$\frac{T+T_o}{T} = \left(\frac{2-E}{E} \right)^{\frac{1}{n}}$$

$$T+T_o = T \left(\frac{2-E}{E} \right)^{\frac{1}{n}}$$

則流下時間 (T_o) 可用下式表示：

$$T_o = T \left[\left(\frac{2-E}{E} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] \dots\dots\dots (22)$$

另一方面，流下式及滲透式如前述：

$$T_o = aL^b Q^c \dots\dots\dots (23)$$

$$T = \left(\frac{d_B}{X} \right)^{\frac{1}{n}} \dots\dots\dots (24)$$

將 (23) (24) 式代入 (22) 式：

$$aL^b Q^c = \left(\frac{d_B}{X} \right)^{\frac{1}{n}} \left[\left(\frac{2-E}{E} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right]$$

$$L^b = \frac{1}{aQ^c} \left(\frac{d_B}{X} \right)^{\frac{1}{n}} \left[\left(\frac{2-E}{E} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right]$$

$$L = \left\{ \frac{1}{aQ^c} \left(\frac{d_B}{X} \right)^{\frac{1}{n}} \left[\left(\frac{2-E}{E} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{b}} \dots\dots\dots (25)$$

又平均灌溉水深假設為 (d)

$$\frac{1}{2} (d_A + d_B) \cdot L = dL$$

而將此代入圖 (6) 的灌溉效率，則

$$\frac{\frac{1}{2} (d_A + d_B) \cdot L - d_B \cdot L}{\frac{1}{2} (d_A + d_B) \cdot L} = 1 - E$$

$$\frac{d \cdot L - d_B L}{d \cdot L} = 1 - E$$

$$d - d_B = d - d \cdot E$$

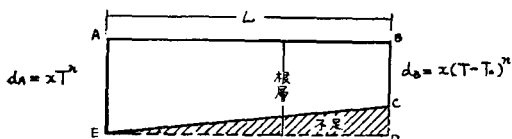
$$\therefore d_B = E \cdot d \dots\dots\dots (26)$$

將 (26) 式代入 (25) 式：

$$L = \left\{ \frac{1}{aQ^c} \left(\frac{E \cdot d}{X} \right)^{\frac{1}{n}} \left[\left(\frac{2-E}{E} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{b}}$$

$$= \left\{ \frac{1}{aQ^c} \left(\frac{d}{X} \right)^{\frac{1}{n}} \left[\left(2-E \right)^{\frac{1}{n}} - E^{\frac{1}{n}} \right] \right\}^{\frac{1}{b}} \dots\dots\dots (27)$$

b) 灌溉效率採用限制灌溉時：圖 (7)



(圖 7)

$$E = \frac{\text{ABCE}}{\text{ABDE}}$$

$$= \frac{\frac{1}{2} [XT^n + X(T-T_o)^n] \cdot L}{XT^n \cdot L}$$

$$= \frac{T^n + (T-T_o)^n}{2T^n} \dots\dots\dots (28)$$

整理 (28) 式

$$2T^n \cdot E = T^n + (T-T_o)^n$$

$$(2E-1)T^n = (T-T_o)^n$$

$$\frac{T-T_o}{T} = (2E-1)^{\frac{1}{n}}$$

$$\therefore T_o = T[1 - (2E-1)^{\frac{1}{n}}] \dots\dots\dots (29)$$

式在此，將滲透率與流下時間之 (23)、(24) 式代入 (29) 式：

$$aL^b Q^c = \left(\frac{d_A}{X} \right)^{\frac{1}{n}} [1 - (2E-1)^{\frac{1}{n}}]$$

$$L^b = \frac{1}{aQ^c} \left(\frac{d_A}{X} \right)^{\frac{1}{n}} [1 - (2E-1)^{\frac{1}{n}}]$$

$$\therefore L = \left\{ \frac{1}{aQ^c} \left(\frac{d_A}{X} \right)^{\frac{1}{n}} [1 - (2E-1)^{\frac{1}{n}}] \right\}^{\frac{1}{b}} \dots\dots\dots (30)$$

$$\text{又 } \frac{1}{2} (d_A + d_B) \cdot L = d \cdot L$$

$$\frac{\frac{1}{2} (d_A + d_B) \cdot L}{d_A \cdot L} = E$$

$$\therefore d_A = \frac{d}{E} \dots\dots\dots (31)$$

將 (31) 式代入 (30) 式：

$$L = \left\{ \frac{1}{aQ^c} \left(\frac{d}{EX} \right)^{\frac{1}{n}} [1 - (2E-1)^{\frac{1}{n}}] \right\}^{\frac{1}{b}} \dots\dots\dots (32)$$

2) 灌溉流量的限制

水足的流下式，隨著使用流量的變化而不同，為了安定其定數，在灌溉時間內必須將水足送達末端為原則。假若畦溝過長的話，將預定灌溉的水量全部流放，則水足在灌溉時間內，無法傳達到畦溝末端。因此，隨著流量的大小，長將畦受限制。

至於畦溝的灌溉時間 (t_i)：

$$t_i = \frac{W \cdot L \cdot d_o}{Q_o} = \frac{0.01667 W \cdot d \cdot L}{Q} \dots\dots\dots (33)$$

t_i ：灌溉時間

W ：畦寬 (m)

L ：畦長 (m)

d_o, d ：灌溉水深 (d_o ：m； d ：mm)

Q_o, Q ：灌溉流量 (Q_o ：CMS； Q ：l/sec)

水足的前進時間 (t) 必須比灌溉時間 (t_i) 短或相等。 ($t \leq t_i$)

$$\text{即 } aL^b Q^c \leq \frac{0.01667 W \cdot d \cdot L}{Q}$$

$$L \leq \left(\frac{0.01667 W \cdot d}{aQ^{1+c}} \right)^{\frac{1}{b-1}} \dots\dots\dots (34)$$

將 (34) 式個別代入 (27)、(32) 式，則其使用的最大流量可以決定。

a) 使用水適用效率時的流量限制：

$$\left\{ \frac{1}{aQ^c} \left(\frac{d}{X} \right)^{\frac{1}{n}} \left[(2-E)^{\frac{1}{n}} - E^{\frac{1}{n}} \right] \right\}^{\frac{1}{b}} \leq \left(\frac{0.01667 W \cdot d}{aQ^{1+c}} \right)^{\frac{1}{b-1}}$$

$$\therefore Q \leq (0.01667 W)^{\frac{b}{b+c}} \cdot a^{\frac{-1}{b+c}} X^{\frac{b-1}{n(b+c)}} \left[(2-E)^{\frac{1}{n}} - E^{\frac{1}{n}} \right]^{\frac{-1}{b+c} \frac{nb-b+1}{n(b+c)}} \dots \dots \dots (35)$$

b) 使用限制灌溉效率時的流量限制：

$$\left\{ \frac{1}{aQ^c} \left(\frac{d}{X} \right)^{\frac{1}{n}} \left[1 - (2E-1)^{\frac{1}{n}} \right] \right\}^{\frac{1}{b}} \leq \left(\frac{0.01667 W \cdot d}{aQ^{1+c}} \right)^{\frac{1}{b-1}}$$

$$\therefore Q \leq (0.01667 W)^{\frac{b}{b+c}} a^{\frac{-1}{b+c}} (XE)^{\frac{b-1}{n(b+c)}} \left[1 - (2E-1)^{\frac{1}{n}} \right]^{\frac{-1}{b+c} \frac{nb-b+1}{n(b+c)}} \dots \dots \dots (36)$$

Q：流量 (ℓ/sec)

W：灌溉幅寬 (m)

a, b, c：水足的前進定數

x, n：滲透定數

E：灌溉效率 (%/100)

d：灌溉水深 (mm)

(35) 及 (36) 兩式，均為已知數，所以流量的使用範圍可決定下來。

(4) 灌溉式的應用

1) 畦長的決定方法：

將作物的灌溉水深 (d)，計劃灌溉效率 (E) 以及水足，滲透量的各定數代入 (35)，(36) 式，則其灌溉流量的使用範圍可以定如下式：

① 水適用灌溉效率

$$Q \leq (0.01667)^{\frac{b}{b+c}} \cdot a^{\frac{-1}{b+c}} X^{\frac{b-1}{n(b+c)}} \left[(2-E)^{\frac{1}{n}} - E^{\frac{1}{n}} \right]^{\frac{-1}{b+c} \frac{nb-b+1}{n(b+c)}}$$

② 限制灌溉效率

$$Q \leq (0.01667)^{\frac{b}{b+c}} a^{\frac{-1}{b+c}} (XE)^{\frac{b-1}{n(b+c)}} \left[1 - (2E-1)^{\frac{1}{n}} \right]^{\frac{-1}{b+c} \frac{nb-b+1}{n(b+c)}}$$

在此，流量的範圍決定之後，再把灌溉水深 (d)，效率 (E) 及比最大流量 (Q_{max}) 小的流量代入 (27)，(30) 式，則可求出適宜的畦長：

① 水適用灌溉效率

$$L = \left\{ \frac{1}{aQ^c} \left(\frac{d}{X} \right)^{\frac{1}{n}} \left[(2-E)^{\frac{1}{n}} - E^{\frac{1}{n}} \right] \right\}^{\frac{1}{b}}$$

② 限制灌溉效率

$$L = \left\{ \frac{1}{aQ^c} \left(\frac{d}{EX} \right)^{\frac{1}{n}} \left[1 - (2E-1)^{\frac{1}{n}} \right] \right\}^{\frac{1}{b}}$$

2) 實驗數據的應用例：

根據前項田間的實驗

水足的流下式： $t_o = 0.1775 L^{1.17} Q^{-0.591}$

滲透量： $d = 2.89 t_o^{0.66}$

t_o, t：時間 (min)

Q：流量 (ℓ/sec)

d：水深 (mm)

各定數為

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{流下式：} a = 0.1775 \\ b = 1.17 \\ c = -0.59 \\ \text{滲透量：} x = 2.89 \\ n = 0.66 \end{array} \right\} \dots \dots \dots (37)$$

若將 (37) 的定數代入 (35)，(27) 及 (36)，(30) 各式，則各灌溉式可以決定之：

a) 水適用灌溉時

$$\left\{ \begin{array}{l} Q \leq 0.9 \times 10^{-2} [(2-E)^{1.52} - E^{1.52}]^{-0.294} d^{1.58} \\ L = 1.102 Q^{0.506} [(2-E)^{1.52} - E^{1.52}]^{0.855} d^{1.30} \end{array} \right.$$

b) 限制灌溉時

$$\left\{ \begin{array}{l} Q \leq 0.9 \times 10^{-2} E^{0.445} [1 - (2E-1)^{1.52}]^{-0.294} d^{1.58} \\ L = 1.102 Q^{0.506} E^{-1.30} [1 - (2E-1)^{1.52}]^{0.855} d^{1.30} \end{array} \right.$$

為了應用上的方便，可將上式用 Monography 來表示。圖(8)(9)(10)(11)

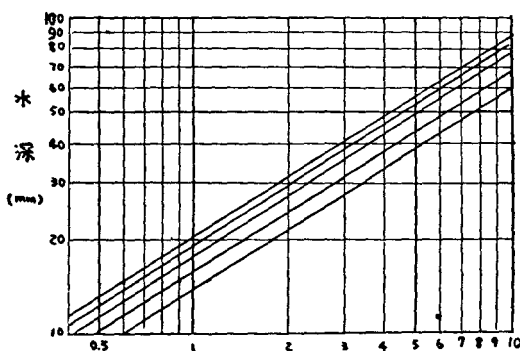


圖 8

流 量 (ℓ sec)

$$Q \leq 0.9 \times 10^{-2} [(2-E)^{1.52} - E^{1.52}]^{-0.294} d^{1.58}$$

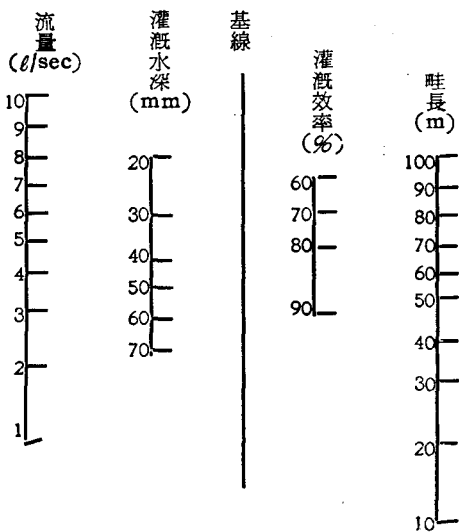
(1) 95% $Q \leq 1.57 \times 10^{-2} d^{1.58}$

(2) 90% $Q \leq 1.28 \times 10^{-2} d^{1.58}$

(3) 80% $Q \leq 1.04 \times 10^{-2} d^{1.58}$

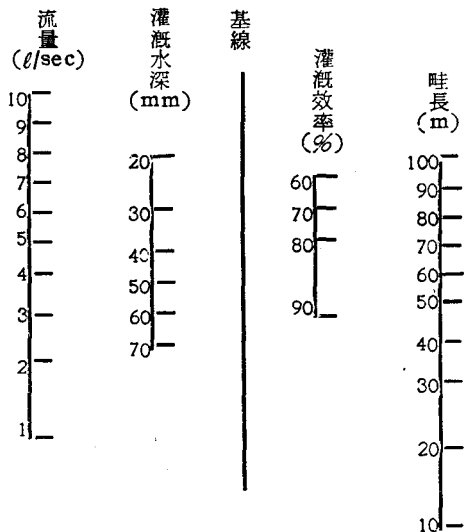
(4) 70% $Q \leq 0.925 \times 10^{-2} d^{1.58}$

(5) 60% $Q \leq 0.851 \times 10^{-2} d^{1.58}$



$$L = 1.102 Q^{0.506} d^{1.80} [(2-E)^{1.52} - E^{1.52}]^{0.855}$$

圖 9



$$L = 1.102 Q^{0.506} d^{1.80} E^{-1.80} [1 - (2E-1)^{1.52}]^{0.855}$$

圖 11

(5) 討論

目前臺灣的水利事業，並非採用按量計價的賣水制度，以使用水量的多少來繳納費用。只能採取「責任灌溉制」，也就是說農民按面積繳納灌溉費用，由水利會負責輸配水量，實施全區域的灌溉。所以只有定時的觀念而無法確實地保持定量的分配。

對於水田的灌溉，只要將定量的水引入區塊，保持田面的浸水，就能達到灌溉的目的。所以農民較易接受。但是旱作的灌溉（重力灌溉），由於定量的水，無法均一的分部，所以在灌溉的實施上較難。一般農民的觀念與要求，灌溉水的水足必須流到畦末，才行斷水。所以在田區的管理上，有決定適宜畦長的必要。

平坦地的灌溉，異於坡地的灌溉，水足的前進，只能依靠灌溉水足的水頭。其前進速度較為遲慢，所以將畦溝做成狹深的方法，提高水頭，將有利於灌溉的效率。圖(12)。

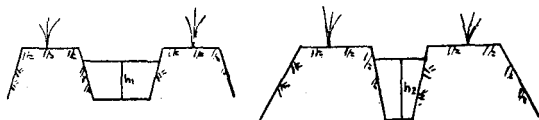
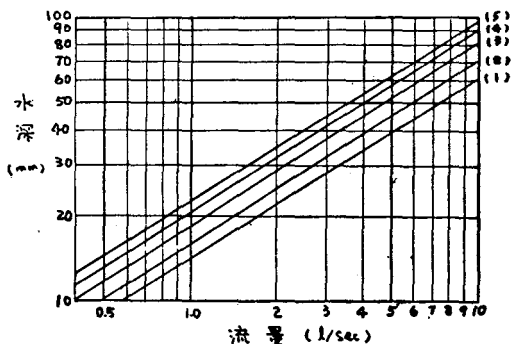


圖 12

$$(h_1 < h_2)$$



$$Q \leq 0.9 \times 10^{-2} E^{0.445} [1 - (2E-1)^{1.52}]^{-0.294} d^{1.58}$$

圖 10

- | | | |
|-----|-----|--|
| (1) | 95% | $Q \leq 1.54 \times 10^{-2} d^{1.58}$ |
| (2) | 90% | $Q \leq 1.24 \times 10^{-2} d^{1.58}$ |
| (3) | 80% | $Q \leq 0.976 \times 10^{-2} d^{1.58}$ |
| (4) | 70% | $Q \leq 0.835 \times 10^{-2} d^{1.58}$ |
| (5) | 60% | $Q \leq 0.737 \times 10^{-2} d^{1.58}$ |

對於灌溉效率，灌溉的目的主要是補給作物的必要水量。故以作物的吸水層（根層）為灌溉的對象。

要是水源豐富，足夠供給全根層以上的話，其灌溉效率的計算，可將損失水量考慮在根層之下。但是，乾季的灌溉，蓄水庫的水量，無法灌溉全部流域，則灌溉的效率損失，用不足之面來計算（限制灌溉）。具有特殊的意義存在。

灌溉式的適用性是由水足的流下式及土壤的滲透式誘導出來的。所以適當的改善耕作方式，是以改善水足的流下式，來提高灌溉效率。但是在經濟的立場上，為改善灌溉效率，投入大量的勞力去整地，將很難得到農民的採納。所以灌溉式的決定，可以依照農家一般習慣的耕作方法，測定代表性的流下式及滲透式，則可求出代表區域性的灌溉式。

實際上，灌溉式的應用，可根據灌溉水深及供給水量，將灌溉效率訂在一定的範圍內。圖(13)，(14)。如灌溉流量的下限，土壤的 Basic intake rate 為 $1\text{ l/sec}/100\text{m}$ ，而上限為防止侵蝕的 6 l/sec ，則灌溉的使用流量範圍可定在 $1-6\text{ l/sec}$ 。所以可從圖(13)的各灌溉水深得知可能維持的灌溉效率範圍。例如，對 40mm 的灌溉水深，可得的灌溉最高效率為 96.5% 。至於灌溉流量過大，而超過侵蝕上限的話，可將一次灌溉的畦數加多，或增加田埂間的寬度，使單位寬的流量減少。另一方面；流量過小的話，可縮短畦長，使之不超過 Basic Intake Rate。

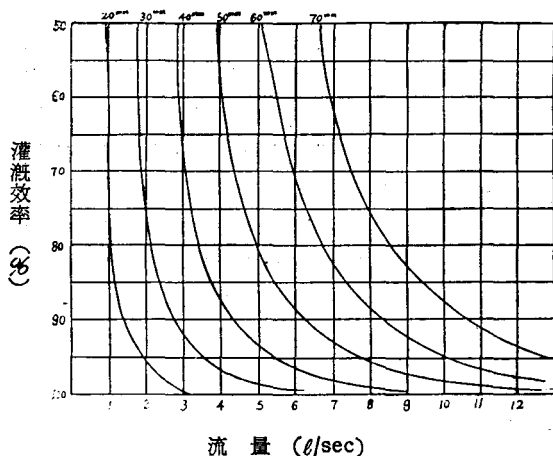


圖 13

$$Q \leq 0.9 \times 10^{-2} E^{0.445} [1 - (2E - 1)^{1.52}]^{-0.294} d^{1.58}$$

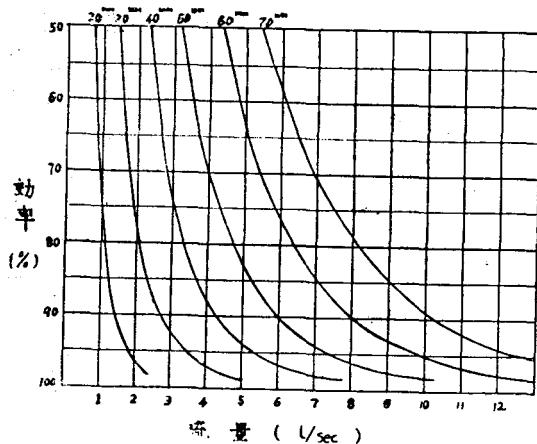


圖 14

$$Q \leq 0.9 \times 10^{-2} E^{0.445} [1 - (2E - 1)^{1.52}]^{-0.294} d^{1.58}$$

III 土水路的性質及改善

(1) 土水路的特性

臺灣的一般灌溉水路，可以說全為水田的灌溉而設，所以流量、水門以及水頭均以水田為基準。而大部分均缺乏水泥內面工。例如代表輪作田的嘉南水利會的水路系統中，幹、支、分線水路，長約 1410km ，其中已有水泥內面工的水路僅 159km ，而限於幹、支等大型的水路。其他如田間的小給水路，大部分是砂質壤土所概成的土水路，輸水損失相當大。根據嘉南水利會的調查，年間的損失水量高達總輸水量的 40% 以上。

水的管理方面，水田灌溉是長期間的通水，所以土水路的輸水損失雖大，其滲透損失則大致可算在穩定的狀態。但是利用同一水路實施間斷的旱作灌溉時，水路的輸水損失變動非常激烈。一般旱作灌溉的通水期間較短，水路的流量變化也大。

根據現場的觀測結果，從分水工 (check gate) 至田間的水給水路之輸水損失列如表(5)

表 5

通水日數 (日)	水路之距離 (m)	水路送水損失 (%)
2	1240	48
3	1200	35
4	684	27
5	304	13
6	182	11
7	92	5

旱作灌溉是斷續的給水方式，所以水路的通水時間也相當短。另外的觀測中，684m 的小給水路通水第一日的損失為52%，但是到了第四日，減少到27%。要是通水日數再增的話，損失也可更少。

分水工是流入區塊的最終量水設施，約 150 ha 設置一處，實施水田灌溉時，由於小給水路是繼續通水狀態，可以說輸水損失已達穩定，所以輪區內的灌溉實施，可以在田間需水量加上輸水損失而計算之。但是在此輪區實施旱作灌溉的話，由於水路過長（分水工至區塊的距離）以及灌溉順序的前後，輸水損失的差異極大，所以為了公平的實施作物的灌溉，必須要重新檢討小給水路的輸水損失。

(2) 末端土路輸水損失之計算

水路的構造、土性、坡度若是固定的話，通水時，水足的前進可以用(38)式表示。

$$T_o = KL^m Q^n \dots\dots\dots (38)$$

T_o = 流下時間 (min)

L = 流下距離 (m)

Q = 流量 (ℓ/sec)

K, m, n = 常數

也就是說，定流量的灌溉，流下時間 (T_o) 可以用 $T_o = \alpha L^\beta$ 來表示。所以只要知曉水路長度的話，可以換算得出水足的流達時間。要是水路的單位長之滲透損失量 (Q_{Loss}) 用 $Q = CT^n$ 式表示的話，區塊的水路假設如圖(15)，從分水工以定流量 (Q) 來灌溉區塊①，則區塊①的取水口之流量為

$$q_1 = Q - \frac{1}{2} [CT_1^n + e(T_o + T_1)^n] L \dots\dots\dots (39)$$

q_1 = 區塊①的取水口流量 (ℓ/sec)

Q = 分水工的流量 (ℓ/sec)

T_1 = 區塊①開始灌溉時的時間 (sec)

T_o = 流達 L 的時間 (min)

e, n = 滲透常數

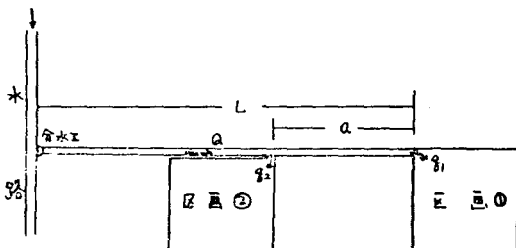


圖 15

如果區塊①灌溉過後，繼續施灌小給水路 (L) 之間的區塊②時，流入區塊②的流量為

$$q_2 = Q - \frac{C}{2} [(T_2 - T_{L-a})^n + T_2^n] (L - a) \dots\dots (40)$$

q_2 = 區塊②的取水口之流量 (ℓ/sec)

T_{L-a} = 區塊②流達時間 (min)

a = 區塊①與區塊②間的水路距離 (m)

通水時間越長， T_2 與 T_{L-a} 的差異越大，所以需要長時間通水的水田灌溉可以把 T_{L-a} 的時間省略，即 $T_2 - T_{L-a} \approx T_2$ 。因此水田的流量可以用(41)式表示。

$$q = Q - cT_2^n (L - a) \dots\dots\dots (41)$$

以分水工為量水標準，來計算各區塊的灌溉時間時，可以用灌溉開始時與完了時的流量之平均，做為區塊的灌溉流量，則區塊的灌溉時間可用(42)式來表示。

$$t = \frac{2A \cdot d}{E(q_o + q_t)} \dots\dots\dots (42)$$

A = 區塊的面積 (m^2)

d = 灌溉水深 (m)

E = 灌溉效率 (%)

q_o = 灌溉開始時，流入區塊的流量 (ℓ/sec)

q_t = 灌溉完了時，流入區塊的流量 (ℓ/sec)

一般短時間通水的旱作灌溉，可以用(42)式計算，但是長期間的水田灌溉，水路的 Intake rate 已達穩定的狀態，所以視為 $q_o = q_t$ 。所以灌溉時間可以用(43)式表示之。

$$t = \frac{A \cdot d}{E \cdot q_o} \dots\dots\dots (43)$$

要是將各區塊之取水口之流量變化加以考慮的話，灌溉會變成非常煩雜的操作，目前的灌溉方法，只能從分水工取入一定的流量，再按面積將水量分配到各區塊，所以很難分配得很平均。但是以區塊為單位，按面積及水深來正確供給水量的話，水路的輸水損失變化，必須得在 Check gate 調節流量，因此很容易導成全灌溉系統的混亂。為了要使末端水路的水量分配正確，必須要設法減少水路的損失。

(3) 梯型土水路與U型水路的比較

目前一般灌溉水路的構造，均屬梯型開水路。幹、支線等大型水路大部分均已實施混凝土內面工來防止輸水的損失。但是從 Check gate 分水之後的小給水路及補給水路，目前仍舊屬於土水路。規格如圖(16)。由於土水路的輸水損失相當大，所以必須設法改善。

近年來，日本相模原開發的旱作田之灌溉系統在末端係採用混凝土製的U型水路。其規格如圖(17)。

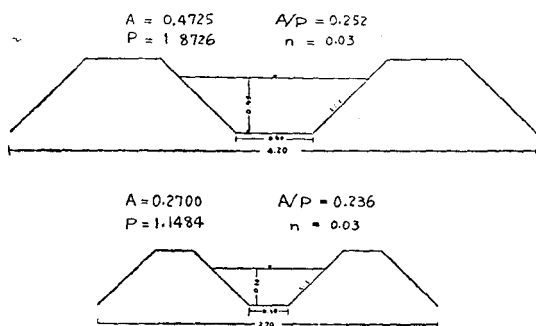
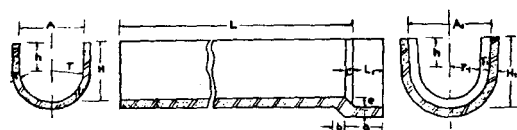


圖 16



單位 mm

型式	規 格 (A×H)	A	H	T	h	r	L	重量kg		
A	210×200	210	200	28	100	100	3000	123		
B	260×240	260	240	30	115	125	4000	206		
規 格	型式	A ₁	H ₁	T ₁	r ₁	L ₁	a	b	e	c
	A	288	240	30	140	100	130	42	20	40
	B	344	282	31	167	100	130	43	20	42

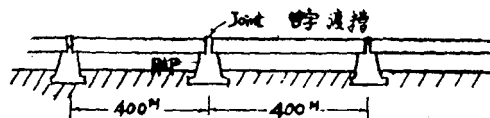
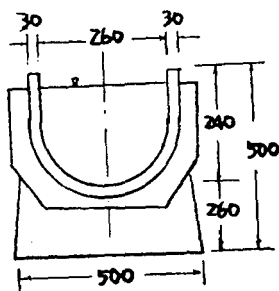


圖 18

在此，將U型水路及梯型土水路的水理性質加以比較：

流量以「kutter」式來計算

$$V = \frac{NR}{\sqrt{R + D}} \quad (44)$$

$$Q = A \cdot V \quad (45)$$

$$N = \left(23 + \frac{1}{n} + \frac{0.00155}{S} \right) \sqrt{S}$$

$$D = \left(23 + \frac{0.00155}{S} \right) n$$

V = 流速

A = 流水面積

R = 水理半徑

n = 粗度係數

S = 坡度

流量的比較如表(6)及表(7)所述，通水斷面小的U型水管的輸水能力，比斷面較大的梯型水路高得多。

最近，由於施工法的進步，U型水槽的製造，可利用高頻率的振盪機以 4000 轉 / 分 的水平振動，加於鐵製的模板，而由底面灌入泥漿的方式，可以製成高密度U型水槽，根據材料實驗，U型水槽，的厚度雖然僅及 3 公分，但其張力每公尺可承受 800 公斤的力量。現將U型水路與梯型水路的特性加以比較：

i) U型水槽可以在石材的生產地附近，大量製造。特別是由於U型水槽的重量較輕，可以簡易地搬運到現場架設。另一方面，由於集中製造，所以有利於成品的品質管理。至於梯型水路的內面工必須要現場施工，對石材的搬運，施工管理上較感不便。所以為了經濟上的利益及提高水路的品質，利用U型水路較為有利。

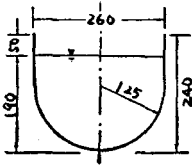
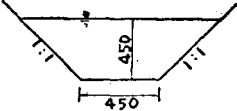
ii) U型水槽的流量，列如表(6)，(7)，比類似的梯型水路要大得多。目前一般梯型水路是以水田的灌溉為主，所以利用既有的水路來灌溉旱作物的話，由於既有水路的通水能力將無法應付旱作物的灌溉。因此利用U型水槽的採用，可以補救水路的通水能力。為了應付旱作灌溉，必須要增加水路的流量，在梯型水路則必要擴大水路斷面，所以在工程上為了增高土堤，必須搬運大量的土材，同時也有擴張基盤的必要。故梯型土水路的改建是相當費事的。尤其是，土水路的灌溉，水路本身與田面間的水頭過低，直接應用在旱作的灌溉，在實施上會有許多的困難。

嘉南的灌溉水路是由幹、支、分線水路到分水工，經 Double gate (二重量水門) 的量水及跌水而流入輪區的小給水路。

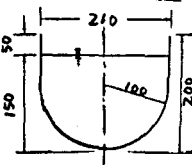
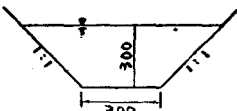
對於水路的改善，若在既存的土水路的一邊土堤上，安置U型水管，則可望提高水頭甚高。如圖(18)，其優點如下：

i) 按照既存的水路之路線設置，不影響配水的順序。

表(6) 小給水路の流量比較

U 字 水 槽					臺 形 水 路				
通 水 斷 面 (單位) (mm)					通 水 斷 面 (單位) (mm)				
(260×240)									
通 水 面 積 A (m ²)			0.4100		通 水 面 積 A (m ²)			0.4725	
潤 周 P (m)			0.5228		潤 周 P (m)			1.8726	
水 理 半 徑 $R=A/P$			0.784		水 理 半 徑 $R=A/P$			0.252	
$\sqrt{R}$			0.886		$\sqrt{R}$			0.503	
n			0.012		n			0.03	
坡 度 $1/x$	N	D	V	Q	坡 度 $1/x$	N	D	V	Q
100	10.649	0.2779	1.497	0.0614	100	5.646	0.695	1.19	0.0562
200	7.5408	0.2797	1.056	0.0433	200	4.053	0.699	0.85	0.0402
300	6.1660	0.2816	0.861	0.0353	300	3.276	0.704	0.68	0.0322
400	5.3744	0.2834	0.744	0.0305	400	2.846	0.709	0.59	0.0279
500	4.7900	0.2853	0.664	0.0272	500	2.546	0.713	0.53	0.0250
600	4.3790	0.2872	0.605	0.0248	600	2.335	0.718	0.48	0.0227
700	4.0604	0.2890	0.559	0.0229	700	2.169	0.723	0.446	0.0211
800	3.8033	0.2909	0.522	0.0214	800	2.031	0.727	0.415	0.0196
900	3.5908	0.2928	0.492	0.0202	900	1.927	0.732	0.392	0.0185
1000	3.4116	0.2946	0.466	0.0191	1000	1.828	0.737	0.371	0.0175

表(7) 補助水路の流量比較

U 字 水 槽					臺 形 水 路				
通 水 斷 面 (單位) (mm)					通 水 斷 面 (單位) (mm)				
(210×200)									
通 水 面 積 A (m ²)			0.259		通 水 面 積 A (m ²)			0.270	
潤 周 P (m)			0.4142		潤 周 P (m)			1.1484	
水 理 半 徑 $R=A/P$			0.625		水 理 半 徑 $R=A/P$			0.236	
$\sqrt{R}$			0.791		$\sqrt{R}$			0.486	
n			0.012		n			0.03	
坡 度 $1/x$	N	D	V	Q	坡 度 $1/x$	N	D	V	Q
100	10.649	0.2779	1.261	0.0327	100	5.646	0.695	1.128	0.0304
200	7.5408	0.2797	0.890	0.0231	200	4.053	0.699	0.806	0.0218
300	6.1660	0.2816	0.725	0.0188	300	3.276	0.704	0.649	0.0175
400	5.3477	0.2834	0.626	0.0162	400	2.846	0.709	0.562	0.0152
500	4.7900	0.2853	0.559	0.0145	500	2.546	0.713	0.501	0.0131
600	4.3970	0.2872	0.509	0.0132	600	2.335	0.718	0.457	0.0124
700	4.0604	0.2890	0.471	0.0122	700	2.169	0.723	0.424	0.0115
800	3.8033	0.2909	0.439	0.0114	800	2.031	0.727	0.394	0.0107
900	3.5908	0.2928	0.413	0.0107	900	1.927	0.732	0.374	0.0101
1000	3.4116	0.2946	0.391	0.0101	1000	1.828	0.737	0.352	0.0095

ii) 水田給水的流量，可趁U型水路的變更，增加流量，使滿足旱作的灌溉。

iii) 由於U型小路安置在土堤上，可以省略甚多基礎工程。

iv) U型水路可同時經過內面工的梯形水路，可以避免水量的損失。

v) U型水路的使用，可以改善農路的寬度。

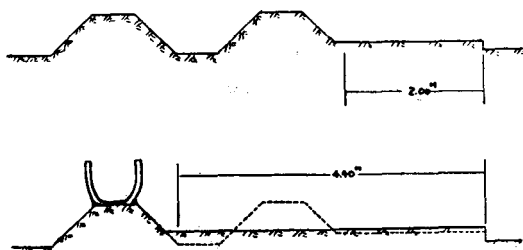


圖 18

(4) U型水路的利用與農路的改善

目前農道的建設，一般均在小給水路旁邊設置2m的農路。由於目前臺灣農業動力的水準，尚在耕牛及小部分的輕型耕耘機，所以農路尚可用敷於運輸。

但以日本農業機械化過程的前例來看，農路的寬度隨著農業機械化的推進，有日漸擴大的趨勢。日本在戰前的農路，寬度約為0.6~0.9m，只能應付行人家畜的通行，但是戰後一再的擴張，到目前，最狹的農路「土地重劃」已達4.5m。

反顧，臺灣最近耕牛漸漸減少，因而為了補助勞動力的不足，已漸開始以耕耘機代替。故以日本戰後農業機械化的前例來看，今後隨著臺灣的農業機械化的發展，農路的擴大是必要的。

根據農業機械化的重型化，車輛的交會所必要的寬度如表(8)：

表 8

交 會 車 輛 的 種 類	路 寬
三輪機車與三輪機車(寬1.55m)	4.0 m
三輪機車與耕耘機(寬1.3 m)	3.75m
三輪機車與牛馬車(寬1.3 m)	
三輪機車與板車(寬1.15m)	3.6 m
耕耘機與耕耘機	3.5 m
牛馬車與牛馬車	
牛馬車與板車	3.35m
板車與板車	2.7 m

所以現階段，臺灣的農路標準稍感過狹，將來難望能够應付重型機械的操作，對於農路的擴充，第一要佔用新的耕地，第二要使用多量的建路用土，第三隨著工程費會加高。

農路的擴建，對於路基用地的收買，牽連的農家多而徵收的面積又少，所以是件相當麻煩的事。

本研究的試案，若在水利會所屬的水路用地內，在一邊的土堤上設置U型水管，而將其餘的部分擴建成農路的一部分，則如圖(18)，如此擴建工程較易實施。其優點如下：

①改建的農路，由於既存農路加上一部分廢除的梯形水路面積，可望從2m的路寬擴建成4.5m的大型農路，而不佔用現存的農地。

②由於農路的擴張，不佔用民地，則不會發生耕地的徵收，而遭遇農民的反對。

③既存土水路，廢除了單邊土堤，可以轉移做道路建設的用途，而節省運費。

IV 田區別的取水技術

一般輪作田的末端水路，從分水工經小給水路，補給水路順序，導水至各田區，而各區塊一般均裝置取水口，因此稻作的灌溉，只是補足田面水深的浸水灌溉，所以從取水口導水入田，即可達到灌溉的目的。但是旱作物的灌溉，只是濕潤性的灌溉，所以為了提高灌溉效率，必須在畦溝前端設置 head ditch。圖(19)。

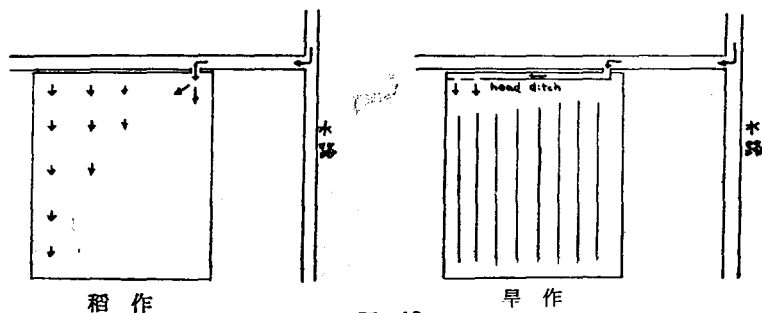


圖 19

目前既存的灌溉方法，對水田並無影響，但是對於旱作灌溉，在每次灌溉必須造成 head ditch 以實施，所以相當費工。

在此，若能使用 U 型水路的話，取水法可以使用虹吸管 (Syphon)，簡單地解決灌溉的問題。同時採用定型的硬質 PVC Syphon 管的，可以正確地量出流量。

1. 虹吸管的設計與性能

要是使用 U 型水路的話，可以直接用 Syphon 引水入田，不必每一區塊設置取水口。由於 Syphon 管的利用是件簡便的導水方式，操作上也非常簡便。U 型水路的水頭約可高出田面一公尺左右，輸水性質是屬於低壓管路。所以隨着虹吸管的材料及設計的差異，流量會有變差。爲了要讓 Syphon 能達輸水及量水的目的，必須要探討 Syphon 管的性質。

若將 Syphon 的各損失係數設爲：

f_1 ：流入口損失係數 0.3

f_2 ：磨擦損失 $f_2 = f \frac{L}{D}$

$$\text{又 } f = \frac{12.7gn^2}{D^{1/3}} \quad (n=0.012)$$

f_3, f_4 彎曲損失 (Weisback 實驗式)

$$\text{即 } f_3, f_4 = \left[0.131 + 1.847 \left(\frac{D}{2r} \right)^{-7/2} \right] \times \frac{Q}{80^\circ}$$

$$V = \sqrt{\frac{2gH}{1 + f_1 + f_2 \frac{L}{D} + f_3 + f_4}}$$

$$Q = AV = A \sqrt{\frac{2gH}{1 + f_1 + f_2 \frac{L}{D} + f_3 + f_4}}$$

$$\text{若 } K = A \sqrt{\frac{2g}{1 + f_1 + f_2 \frac{L}{D} + f_3 + f_4}}$$

$$\text{則 } Q = K \sqrt{H} \dots \dots \dots (46)$$

Syphon 的設計如圖 (20)

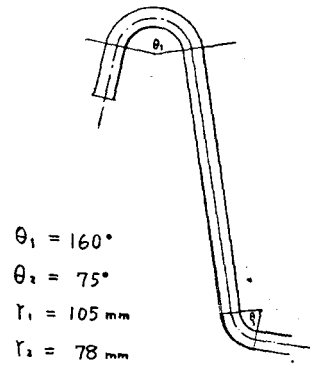


圖 20

依據(46)式，將各水管的內徑與落差及流量之關係列如圖(21)。

2.5"	$Q = 0.86H^{0.5}$
3"	$Q = 1.63H^{0.5}$
4"	$Q = 2.52H^{0.5}$
5"	$Q = 3.60H^{0.5}$

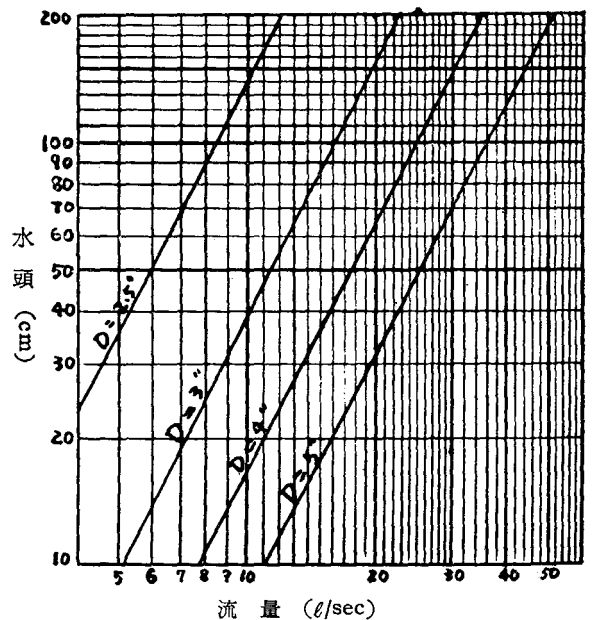


圖 21

2. 區塊內的管路輸水

水田的灌溉可從 U 型水路直接用 Syphon 導水入田區就可達到灌溉的目的。但是旱作灌溉，爲了提高灌溉效率，一度跌水導入田區的水量，再度利用管路輸送到較遠的田區，來解決區塊內的輸水損失發生。

a) 區塊內管路的設置如圖(22)

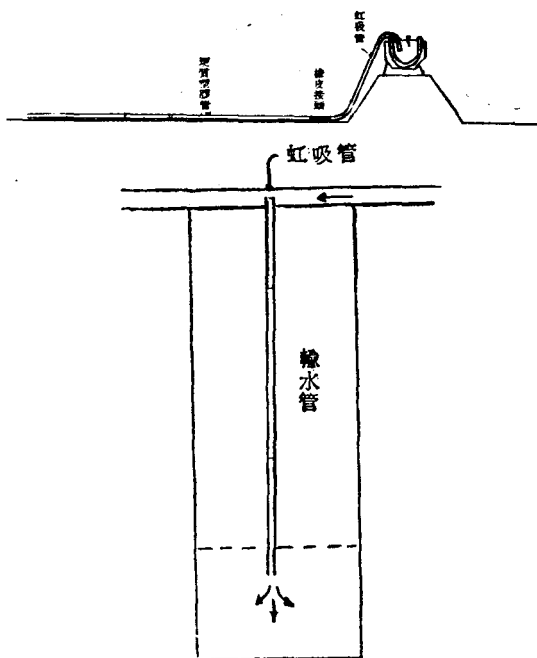


圖 22

b) 管水路の流量，將隨著管路的長短，而有很大的差異。

$$Q = A \sqrt{\frac{2gH}{1 + f_1 + f_2 \frac{L}{D} + f_3 + f_4}}$$

所以

$$L = \frac{2gA^2DH}{Q^2 f_2} - \frac{D}{f_2} (1 + f_1 + f_3 + f_4) \dots (47)$$

L : 管長 (m)

A : 管路斷面積

D : 管內徑

H : 水頭

Q : 流量

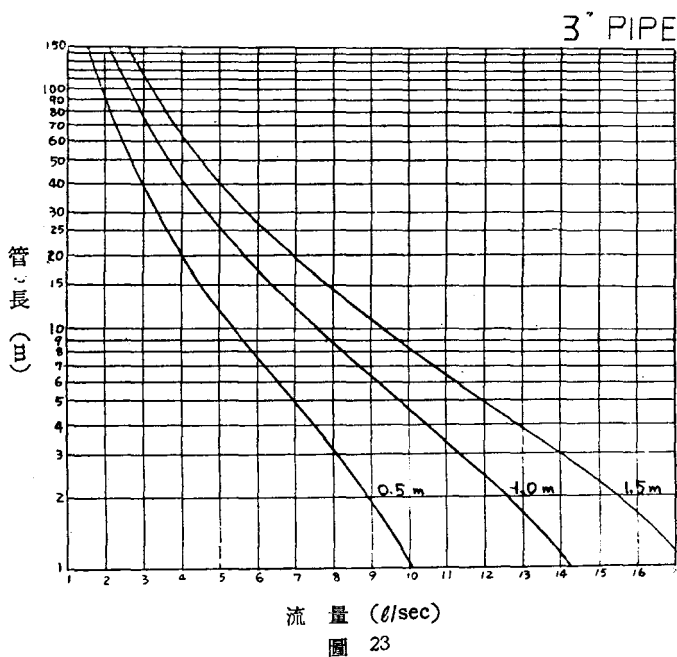
f_1 : 流入損失 0.7

f_2 : 磨擦損失

$f_3 f_4$: 彎曲損失

若將灌溉使用的塑膠管直徑定為 3'', 4'', 5'',

則管長與流量的關係列如圖(23)、(24)、(25)。



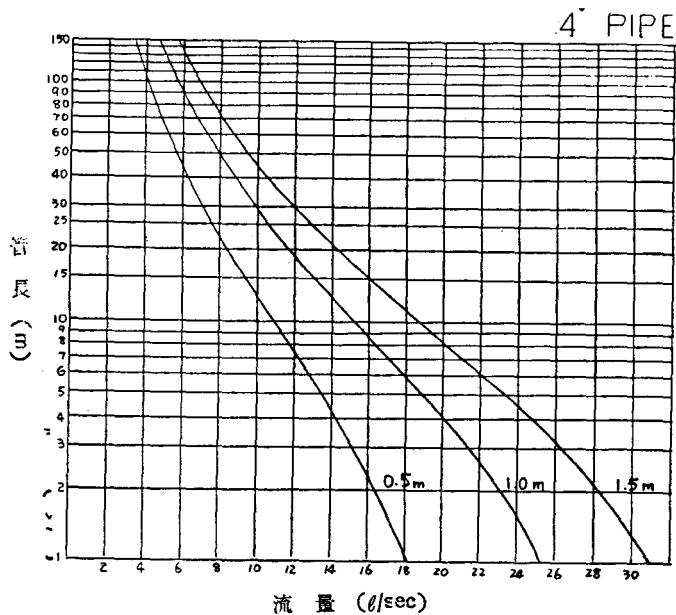


圖 24

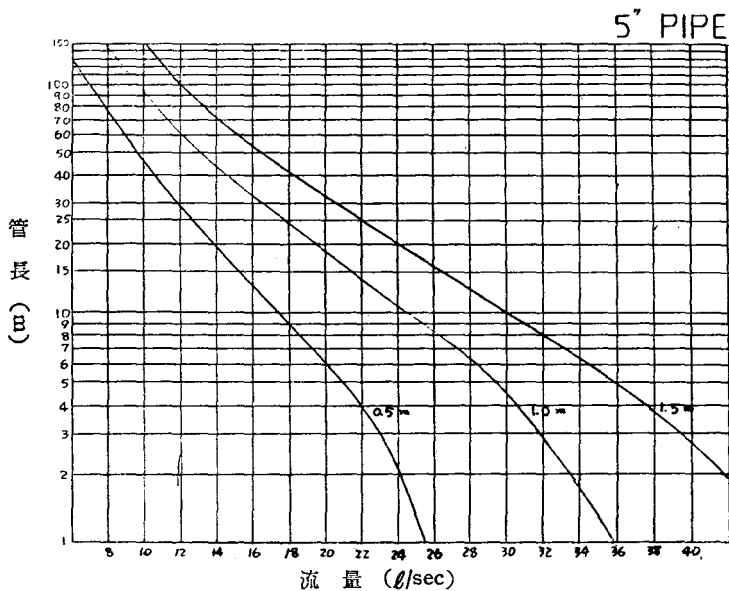


圖 25

3. 討論

虹吸管的利用，有如下之幾個優點：

a) U 型水路的水頭，大致上可以視為一定，流量的調節，可以利用定型虹吸管的直徑與管長來計算，所以不用取水口，能够正確地將水量輸送到田區。另一方面，由於 Syphon 的流量是定流量，所以對畦溝及田埂間的灌溉可以代入灌溉式來決定畦長。

b) 水路及附近的構造物不破損：一般的土水路的灌溉，必須得在區塊的入口設置暫時性的取水口，因此水路的破損非常嚴重，同時在灌溉期間，為了引水及斷水將會相當麻煩。但是 U 型水路的灌溉實施，只是 Syphon 的裝設與抽除，所以可以避免損害水路的構造。

c) 節省灌溉水：利用 Syphon 的灌溉，是在

灌溉終了時抽除 Syphone 即可，接著下一組也可以利用同一水管繼續開始灌溉，所以從 Check gate 運轉過來的流量，可以定量地再導入田區，而提高水量的有效性。特別是 U 型水路與一般土水路相異，可以避免末端水路的輸水損失。

d) 避免農民的水爭：在輪流灌溉的實施中，每一區塊均應定量定時公平的實施輪灌，至於爭水糾紛的發生原因，可以說是由於上游的農民盜取計劃內的水量，使得下游水量不足，而影響整個的灌溉實施。所以 U 型水路的灌溉，可以利用 Syphon 由末端先灌，採取輪流取水的方式，並限制虹吸管的隻數，而固定水路的取水量，而安定流量，同時利用虹吸管的交替來控制農民的灌溉時間及水量。

V 輪作田的灌溉實施

灌溉系統是由水源、幹線、支線、給水路、區塊的順序來導水。水田的灌溉以面積來換算田間用水量，並將此量導入田區就可。所以管理上較為方便，也就是說，灌溉管理只顧及到區塊或輪區就可。但是旱作物的灌溉，必得將定量的水在定時內，導入田區並將其均勻地分佈在農田。這是旱作灌溉的主要重點。

所以末端輪區的灌溉實施，又可分成輸水管理及

區塊內的灌溉操作二個部份：

i) 末端水路的灌溉管理以 50 ha 為一輪區，而設置量水設備，灌溉時將輪區必要的水量按定流量從 Check gate 取入，再分配到各區塊。至於區塊內的灌溉以當時的耕作方式及生長情形，可能有相當大的差異。至於灌溉操作是由農民各自將流入區塊的水量，適當地在田區內分配施灌，所以區塊內的灌溉效率的優劣，隨農民的操作有相當的差異。但是這對全體輪區的灌溉並無影響。

ii) 在輸水管理方面，將水輸送到各區塊為主要的目的。目前由於各區塊的作物別及栽培時期參雜不齊，所以灌溉水量的輸送極為複雜。因此輪區的灌溉應力求共同栽培管理，則灌溉水量的配輸，可由 Check gate 取入一定的流量，對輪區內的輸水管理的調節也較易執行。

灌溉是牽連多數農家的綜合操作，所以在實施上在定時定量的原則下必須合理地力求簡化才行。

1. 稻作的灌溉計劃

稻作生長期間的日用水量，因地形、時期及土質而有相當的差異。根據嘉南水利會的輪灌計劃的稻作日用水量變化，列表如(9)。

表9 水稻之生長，土質及日用水量

稻 作 栽 培 日 期		砂 土		壤 土		粘 土	
		日用水量 mm/day	灌 溉 率 ha/C.M.S	日用水量 mm/day	灌 溉 率 ha/C.M.S	日用水量 mm/day	灌 溉 率 ha/C.M.S
整 地 用 水 量 (mm)		133.0	64.8	112.0	77.1	100.0	86.4
移 植 期	第 1 旬	7.8	1107	6.4	1350	5.1	1700
分 蘗 前 期	第 2 旬	7.1	1217	5.8	1485	4.6	1870
分 蘗 有 效 決 定期	第 3 旬	6.5	1328	5.3	1620	4.2	2040
最 高 分 蘗 期	第 4 旬	6.5	1328	5.3	1620	4.2	2040
幼 稈 形 成 期	第 5 旬	7.1	1217	5.8	1485	4.6	1870
孕 穗 期	第 6 旬	8.7	996	7.1	1215	5.7	1530
出 穗 期	第 7 旬	8.7	996	7.1	1215	5.7	1530
乳 熟 期	第 8 旬	7.8	1107	6.4	1350	5.1	1700
糊 熟 期	第 9 旬	7.8	1107	6.4	1350	5.1	1700

正如此表，稻作的整地用水量，一次耗用 100mm 以上，所以全區域同時栽培水稻的話，水路的容量必須要很大才能應付所需。所以將稻作的栽培日期給與適當的時差，盡量使 peak 用水量減少，來減輕水路工程費用的負擔。表 10。是以嘉南地域的壤土為例，在整地的第一旬，整地輪區的二分之一，其水量為

$\frac{1}{2}P$ ，其後再加上移植後的用水量 $\frac{1}{2}I$ 。共為第一旬的耗用水量。其次在移植期（移 1 旬），整地輪區的三分之一，及其用水量 $\frac{1}{3}I_0$ ，所以再加上前旬已整地種植的 $\frac{1}{3}I$ 是第二旬的日用水量。以下，同樣地計算下去，各旬別的日用水量列表 10 的右端。所以可以根據此來定一輪區的田區用水量。

表10 輪區域之日用水量計算

稻作栽培時期		按照給水量，將整地分成三旬。	如以壤土為例，整地用水量 (P) 為 112mm，各旬別之日用水量為； $I_0, I_1 = 6.4mm$ ， $I_2: 5.8, I_3: 5.3, I_4: 5.3, I_5: 5.8, I_6: 7.1, I_7: 7.1, I_8: 6.4, I_9: 6.4$ (參照表 9)	日用水量 (mm)
		第 1 旬 $\frac{1}{3}$ (全面積) 第 2 旬 $\frac{1}{3}$ (全面積) 第 3 旬 $\frac{1}{3}$ (全面積) (整地用水量；P, 用水量； I_0)		
整地	整 1 旬	$\frac{1}{3}P + \frac{1}{3}I_0$	$\frac{1}{3} \times 112 + \frac{1}{3} \times 64 = 88.0$	8.8
移植期	移 1 旬	$\frac{1}{3}P + \frac{1}{3}I_1 + \frac{1}{3}I_0$	$\frac{1}{3} \times 112 + \frac{1}{3} \times 64 + \frac{1}{3} \times 64 = 90.6$	9.1
分蘖前期	移 2 旬	$\frac{1}{3}P + \frac{1}{3}I_2 + \frac{1}{3}I_1 + \frac{1}{3}I_0$	$\frac{1}{3} \times 112 + \frac{1}{3} \times 58 + \frac{1}{3} \times 64 + \frac{1}{3} \times 64 = 79.7$	8.0
有效分蘖決定期	移 3 旬	$\frac{1}{3}I_3 + \frac{1}{3}I_2 + \frac{1}{3}I_1$	$\frac{1}{3} \times 53 + \frac{1}{3} \times 58 + \frac{1}{3} \times 64 = 56.5$	5.7
最高分蘖期	移 4 旬	$\frac{1}{3}I_4 + \frac{1}{3}I_3 + \frac{1}{3}I_2$	$\frac{1}{3} \times 53 + \frac{1}{3} \times 53 + \frac{1}{3} \times 58 = 54.0$	5.4
幼穗形成期	移 5 旬	$\frac{1}{3}I_5 + \frac{1}{3}I_4 + \frac{1}{3}I_3$	$\frac{1}{3} \times 58 + \frac{1}{3} \times 53 + \frac{1}{3} \times 53 = 55.5$	5.6
孕穗期	移 6 旬	$\frac{1}{3}I_6 + \frac{1}{3}I_5 + \frac{1}{3}I_4$	$\frac{1}{3} \times 71 + \frac{1}{3} \times 58 + \frac{1}{3} \times 53 = 63.6$	6.4
出穗期	移 7 旬	$\frac{1}{3}I_7 + \frac{1}{3}I_6 + \frac{1}{3}I_5$	$\frac{1}{3} \times 71 + \frac{1}{3} \times 71 + \frac{1}{3} \times 58 = 69.2$	6.9
乳熟期	移 8 旬	$\frac{1}{3}I_8 + \frac{1}{3}I_7 + \frac{1}{3}I_6$	$\frac{1}{3} \times 64 + \frac{1}{3} \times 71 + \frac{1}{3} \times 71 = 67.7$	6.8
糊熟期	移 9 旬	$\frac{1}{3}I_9 + \frac{1}{3}I_8 + \frac{1}{3}I_7$	$\frac{1}{3} \times 64 + \frac{1}{3} \times 64 + \frac{1}{3} \times 71 = 65.0$	6.5
黃熟期	移 10 旬	$\frac{1}{3}I_9 + \frac{1}{3}I_8$	$\frac{1}{3} \times 64 + \frac{1}{3} \times 64 = 31.7$	3.2
成熟期	移 11 旬	$\frac{1}{3}I_9$	$\frac{1}{3} \times 64 = 10.7$	1.1

對於配水，輪區的秧田預定日數為 R 日，而輪區內的水田單位面積為 A_n (ha)，灌溉率為 I_n ，則單位面積的整地秧田日數為：

$$\text{整地秧田日數} = \frac{A_n/I_n}{\sum(A_n/I_n)} \dots\dots\dots(48)$$

a_n 輪區內一天的灌溉面積 (A)

$$A = \frac{L_n \sum(A_n/I_n)}{R} (ha) \dots\dots\dots(49)$$

根據(48)及(49)式的計算，輪區內的整地及秧田的順序及日數可以分配。

水路的容量，由於 Peak 用水量為 9.1mm，所以設計日用水量為 10mm 所以 50ha 輪區的小給水路流量可以採用由末端灌回來的方式，以水田區塊別來灌溉。取水的方法仍以 U 型水路以虹吸管導水入田

，同時限制虹吸管的支數來控制流量，至於各區塊的灌溉時間可用虹吸管的交換來控制，所以水的節約及灌溉管理均非常方便。

2. 輪作田的旱作灌溉

(i) 灌溉計劃

旱作的灌溉計劃是以水田構造的 50ha 之輪區單位為實施標準，從輪區的 Check gate 導入一定的流量，並在指定的時間內，實施輪區內的灌溉。在此將灌溉計劃的順序加以說明。

a) 灌溉時期及灌溉水深：輪區內作物，應求共同栽培，根據臺南改良場蘇匡基先生的整理，按作物生理的立場，將主要旱作物的灌溉時期及適當灌水深度列表(11)。

表 11

作物	主要的灌溉時期	栽培季期	灌溉時期及水量	增收率 (%)
甘 藷	塊根肥大盛期	秋 作	插植後 20 日灌溉 60mm 一回	21 %
落 花 生	開花盛期~莢果膨大期	春 作 秋 作	插植後 50 日灌溉 50mm 一回	68
			插植後 75 日灌溉 50mm 一回	32
大 豆	開花盛期~莢果發育初期	春 作 秋 作	播種後 60 日灌溉 50mm 一回	114
			播種後 55 日灌溉 50mm 一回	26
玉 米	抽絲期前~結實初期	春 作 秋 作	播種後 60 日灌溉 50mm 一回	228
			播種後 60 日灌溉 50mm 一回	52
小 麥	稔形成期~出稔開花期	秋 作	播種後 45 日灌溉 50mm 一回	48

輪區的共同栽培管理，是按水路的容量及作物的灌溉水深來計算全輪區的灌溉日數。同時作物栽培的順序也加以適當的調節，由末端先行栽植及灌溉。至於灌溉是以全輪區為對象，在必要的時候加以施灌全區。

b) 灌溉效率 (E) 的決定：若輪區的灌溉時期及灌溉水深已決定的話，其灌溉水量 (I) 可以根據面積計算得出。所以全灌溉系統的灌溉水量 (ΣI) 可由各輪區的灌溉水量合計而得。另一方面，水庫的有效水量同灌溉期間預定流入水庫的水量 (S)，再將水路的輸水損失設為 (L)，則計劃使用的灌溉效率 (E)，可由下式決定。

$$(S-L) \cdot E = \Sigma I$$

$$\therefore E = \frac{\Sigma I}{S-L} \dots\dots\dots (50)$$

E : 灌溉效率 (%)

ΣI : 各輪區灌溉水量的總合 (M^3)

S : 有效給水量 (M^3)

L : 到輪區的水路損失 (M^3)

從水庫到各輪區的附近口之間的輸水損失，可由多年的量水記錄求得。至於流入水庫的流量，會隨著灌溉期間的降雨，多少會有一點變化。特別是旱作灌溉的期間較短，所以可以不受影響。至於各輪區內的灌溉操作，只要各區塊確保其灌溉效率即可。

c) 田間灌溉流量的限制及一次灌溉畦數的決定法：畦溝灌溉是根據灌溉水深、流量及效率，其灌溉時間會有不同。因此以作物別的灌溉水深 (d) 及計劃灌溉效率 (E) 代入 (35) 式，則可決定使用流量的上限。

$$q \leq (0.01667W)^{\frac{b}{b+c}} a^{\frac{-1}{b+c}} x^{\frac{b-1}{n(b+c)}} \left[(2-E)^{\frac{1}{n}} - E^{\frac{1}{n}} \right]^{\frac{-1}{b}} d^{\frac{nb-b+1}{nb(b-1)}}$$

區塊內的灌溉實施，可以採用 U 型水路給水，至於虹吸管的流量 (Q) 隨著水頭的高度及使用口徑的不同 ($Q = K\sqrt{H}$)，可以計算出來。圖(23)。至於一次的灌溉畦數 (n) 可由下式求得：

$$Q \div q = n \dots\dots\dots (51)$$

Q : 虹吸管流量 (ℓ/sec)

q : 畦溝流量的上限 (ℓ/sec)

n : 一次灌溉的畦溝數 (整數)

d) 灌溉畦長的決定方法：一般農地的區塊，均呈狹長型，短邊 30~50m 不一，而長邊達 100~150m。而水路是隨著短的區塊邊。圖(26)。

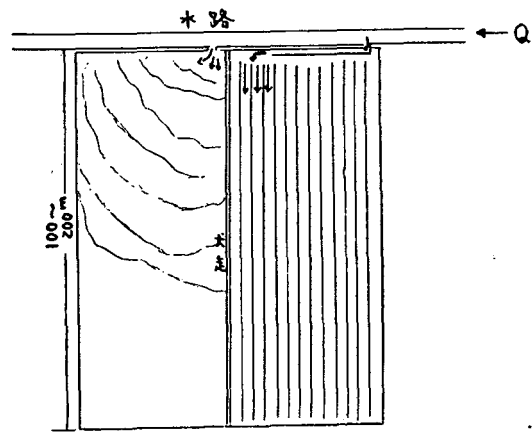


圖 26

畦長的限制而定的區塊內之 Sub-pattern 的決定法 (參照圖 27)。

i) 若將水路從虹吸管直接導入田區的流量為 Q，則 A pattern 的畦長 (L_A) 可代入 52 式來決定：

$$L_A = \left\{ \frac{1}{a(Q/n)^c} \left(\frac{d}{X} \right)^{\frac{1}{n}} \left[(2-E)^{\frac{1}{n}} - E^{\frac{1}{n}} \right] \right\}^{\frac{1}{b}} \dots\dots\dots (52)$$

N : 一次的灌溉畦數

Q : 虹吸管的流入量 (ℓ/sec)

d : 灌溉水深 (mm)

E : 灌溉效率 (%)

a, b, c, x, n : 常數

ii) B pattern 的灌溉，係利用管路引到 B pattern 的邊端、管路係屬 A pattern，所以管長與 A pattern 相同，($\ell_B = L_A$)，在此將 ℓ_B 代入 53 式。

$$Q = 2A^2 g H D f_a^{-1} \ell^{-1} - D f^{-2} (1 + f_1 + f_3 + f_4) \dots\dots (53)$$

則 B pattern 的流入量 (Q_B) 可計算出。

iii) B pattern 的畦長 (Furrow length)，可將 Q 代入 52 式，則 L_B 也可定下。

iv) 同樣地，C pattern 的輸水管長 $\ell_C = L_A + L_B$ 所以代入 53 可求得 Q_C 值，再將 Q_C 代入 52 式，則可決定 L_C 。

v) 若要將區塊的長度定為 (L)，則

$$L = L_A + L_B + L_C + \dots\dots + L_n \pm R \\ = \Sigma L_A \pm R \dots\dots\dots (54)$$

R 值是剩餘或是超過的部分。R 的數值小於 L_n 。利用管路的輸水量， $Q_A > Q_B > Q_C > \dots\dots > Q_N$ ，將之代入 52 式則

$$L_A > L_B > L_C > \dots > L_n$$

至於 R 的分配方法可由下式求得：

$$\left(1 + \frac{L - \sum L_A}{\sum L_A}\right) = K$$

$$\therefore L = K \sum_{i=1}^n L_A = K(L_A + L_B + \dots + L_n) \dots (55)$$

所以根據(55)式，可將 A、B、C...N 各 Pattern 的畦長決定下來。

e) 各 Pattern 的灌溉時間：決定各 Pattern 的畦長的主要目的，是將灌溉效率保持在一定的計劃值以內，同時又要使各 Pattern 的灌溉時間一致。致於各 Pattern 的灌溉時間：

$$t = \frac{n \cdot W \cdot L \cdot d}{E \cdot \sum Q} \text{ (sec)} \dots \dots \dots (56)$$

n : 灌溉畦數

W : 畦寬 (m)

L : 畦長 (m)

d : 灌溉水深 (m)

E : 灌溉效率 (%)

$\sum Q$: 各 Pattern 的流入量之和 (C.M.S.)

t : 灌溉時間 (sec)

(ii) 灌溉管理

a) 區塊內的灌溉管理 (圖27)。

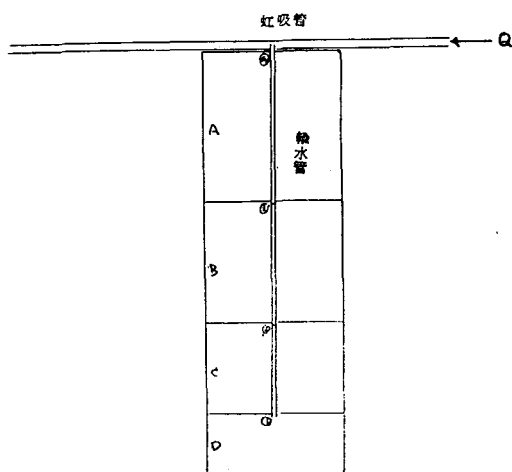


圖 27

i) 根據灌溉計劃，可以將區塊分為幾個 Pattern 如圖(27)。

ii) 灌溉前，將管路安置到距離水路最遠的 Pattern 之入口為止。

iii) 灌溉從 D Pattern 開始，每一 Pattern 的灌溉時間是區塊總灌溉時間除以 Pattern 數。

iv) D Pattern 的灌溉完了時，將輸水 pipe 之接頭②處放開，則可馬上接連開始 C Pattern 的灌溉，同樣地再灌 B 區及 A 區。

v) 使用過的 pipe，可以搬到其他的相鄰的耕地，繼續使用。利用管水路的灌溉，可以說完全避免了區塊內的輸水損失。

b) 輪區的灌溉管理

輪區的灌溉操作，並不以既存的區塊為單位，而將區塊內的 Pattern 做為灌溉的對象。圖(28)。

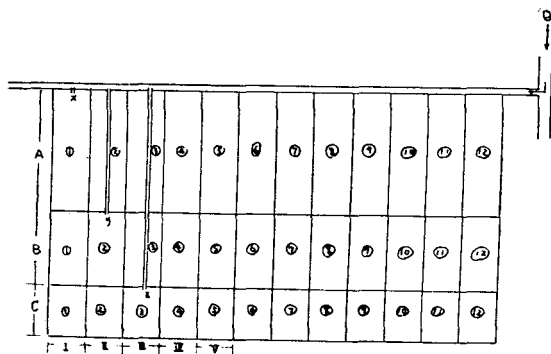


圖 28

i) 各農田區塊，均分成 A、B、C Pattern，各 Pattern 的灌溉時間均一。

i) 灌溉依①，②，……(n)的順序，從末端開始。

iii) 輪區的灌溉流量，始終是 $Q_A + Q_B + Q_C$ ，也就是說輪區從 Check gate 引進水量是一定的。

iv) 虹吸管及管水路應視為水利會之公物，不使農民私有。其目的是可以準確地量水及控制灌溉時間。例如圖(28)的 I 組使用完的管路馬上，搬運到 IV 組去裝置。

VI 田區的灌溉實施與灌溉式的應用

臺灣的主要旱作物、如甘藷、甘蔗及蔬菜等的栽培，均係採用畦溝方式，也可以說是目前最通俗的栽培方法。因此旱作物的灌溉必須要設法盡量滿足全耕地的根層水量。此外，按地域別就農家的經營方式，求出畦溝的灌溉方法並依地域的土壤條件、作物、耕作狀態等，來決定各灌溉標準。

田間的灌溉各田區的差異很大，比空白的 Border 及 Furrow 的實驗式更為複雜。因此在灌溉實施上，必須要考慮各狀態的水足前進式與滲透量，來決定灌溉式。以下以嘉南水利會實施的田區實驗的數據為

例，來引證新灌溉式的實用性。

1. 畦溝灌溉 (Furrow Irrigation)

(A) 畦溝灌溉的觀測

表 12

土壤深度	土壤質地	假比重	水分當量(%)		田間容水量 Field Capacity (%)	凋萎點 Wilting point (%)
			離心機法	$\frac{1}{3}$ Atm		
0~20	砂壤土	1.45	11.71	11.28	18~20	3.46
20~40	砂壤土	1.41	11.01	10.57	18~20	3.87
40~60	壤土	1.31	16.37	16.36	21~22	4.87
60~80	坭質壤土	1.34	23.87	25.42	25~26	6.54

表 13

測點 \ 測溝	6ℓ/sec	5ℓ/sec	4ℓ/sec	3ℓ/sec	2ℓ/sec
10	0	0	0	0	0
20	4.0	0	0	3.0	-0.5
30	4.5	2.0	-1.0	4.5	-1.0
40	3.0	1.0	0	3.0	-2.0
50	3.5	1.0	-0.5	1.5	0.5
60	3.5	3.0	1.0	3.0	0.5
70	2.0	0	-1.0	4.0	3.0
80	2.0	-1.0	1.0	0.5	-0.5
90	3.5	-1.0	-2.5	1.5	-2.0
100	0	2.0	1.0	-1.5	-0.5
最大高差	4.5	4.0	3.5	6.0	5.0

註：以10m為基準。

表 14

流 下 距 離		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
(m)												
流	2	到達時間 (分)	1.2	3.0	5.4	8.3	12.4	16.0	20.8	25.1	31.6	37.9
			1.2	3.1	5.6	9.4	14.2	18.9	22.6	29.9	36.3	40.6
			1.2	3.2	5.8	8.4	11.6	15.5	19.2	23.8	29.1	34.9
		平 均	1.2	3.1	5.6	8.7	12.7	16.8	20.9	26.6	32.3	37.4
	3	到達時間 (分)	0.9	2.4	4.7	7.4	10.6	13.6	17.2	20.2	23.9	28.0
			0.9	2.1	3.5	5.4	8.2	10.6	13.0	16.2	19.0	23.0
			1.0	2.5	4.4	7.0	10.0	12.2	17.2	21.7	24.8	30.3
		平 均	0.9	2.3	4.2	6.6	9.6	12.1	15.7	19.4	22.6	27.1

量	4	到達時間 (分)	0.7	1.7	3.5	5.2	8.0	10.7	13.4	16.2	19.5	21.9
			0.6	1.7	3.0	4.7	6.9	9.0	11.7	14.2	16.9	20.0
			0.6	1.6	3.0	4.8	7.0	9.3	11.4	13.7	16.8	19.8
	5	到達時間 (分)	0.7	1.6	3.3	5.2	7.2	9.5	11.7	14.1	16.8	19.0
			0.6	1.4	2.5	3.9	6.0	7.6	9.6	11.6	14.0	16.6
			0.7	1.6	2.7	4.4	6.6	9.0	11.2	13.6	16.4	19.2
l/sec	6	到達時間 (分)	0.7	1.5	2.8	4.5	6.6	8.7	10.8	13.1	15.7	18.2
			0.6	1.5	2.5	4.0	5.6	7.2	9.0	11.1	13.1	15.2
			0.8	1.7	2.6	4.0	5.6	7.2	9.0	11.1	13.1	15.5
	6	平均	0.6	1.5	2.5	4.0	5.5	7.2	9.1	11.2	13.2	15.4
			0.6	1.5	2.5	4.0	5.5	7.2	9.1	11.2	13.2	15.4
			0.6	1.5	2.5	4.0	5.5	7.2	9.1	11.2	13.2	15.4

在此將各流量的平均流速時間取出，用最小二乘法求出水足的流下式 ($t = \alpha L^{\beta}$) 列如表 (15) 及圖 (29)

表 15

畦長 (l/sec)	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
10	1.2	0.9	0.6	0.7	0.6
20	3.1	2.3	1.7	1.5	1.5
30	5.6	4.2	3.2	2.8	2.5
40	8.7	6.6	4.9	4.5	4.0
50	12.7	9.6	7.3	6.6	5.5
60	16.8	12.1	9.7	8.7	7.2
70	20.9	15.7	12.2	10.8	9.1
80	26.6	19.4	14.7	13.1	11.2
90	32.3	22.6	17.4	15.7	13.2
100	37.4	27.1	20.6	18.2	15.4

進一步爲了求出流量之間流下式之變化，以時間、距離、流量三者的關係求出 $t = \alpha L^{\beta} Q^{\gamma}$ 式。最先將表(15)的取對數列如表(16)。則

表 16

logQ	0.30	0.48	0.60	0.70	0.78
logL					
1.00	0.08	-0.05	-0.22	-0.16	-0.22
1.30	0.49	0.36	0.23	0.18	0.18
1.48	0.75	0.62	0.51	0.46	0.40
1.60	0.94	0.82	0.69	0.65	0.60
1.70	1.10	0.98	0.86	0.82	0.74
1.78	1.22	1.08	0.99	0.94	0.86
1.85	1.32	1.20	1.09	1.03	0.96
1.91	1.43	1.29	1.17	1.12	1.05
1.96	1.51	1.35	1.24	1.20	1.12
2.00	1.57	1.43	1.31	1.26	1.19

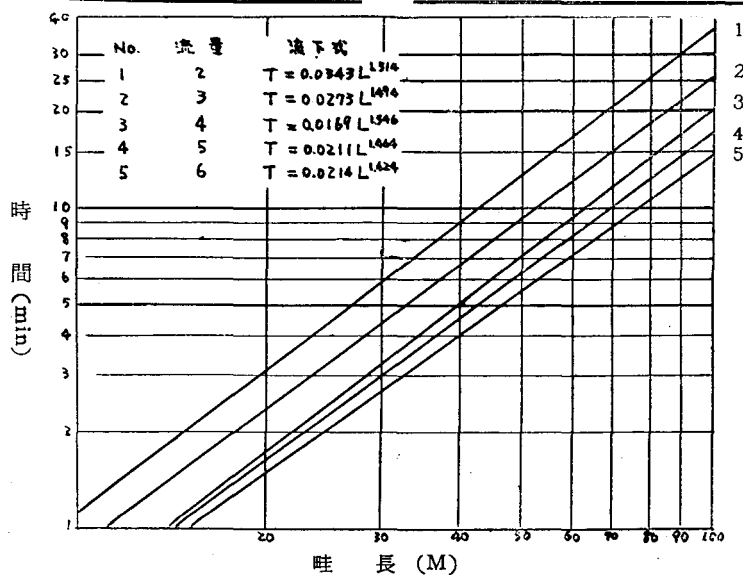


圖 29

$$N=50$$

$$\Sigma \log t = 41.74$$

$$\Sigma \log L = 82.90$$

$$\Sigma \log Q = 28.60$$

$$\Sigma (\log t \cdot \log c) = 75.97$$

$$\Sigma (\log L^2) = 142.05$$

$$\Sigma (\log L \log Q) = 47.43$$

$$\Sigma (\log t \log Q) = 22.84$$

$$\Sigma (\log Q^2) = 17.80$$

將上式代入 (9) 式得

$$\begin{cases} 41.74 = 50 \log a + 82.90b + 28.60c \\ 75.97 = 82.90 \log a + 142.05b + 47.43c \dots (57) \\ 22.84 = 28.60 \log a + 47.43b + 17.80c \end{cases}$$

求出 (57) 式的解，則水足的實驗式為

$$t = 0.0545 L^{1.503} Q^{-0.696} \dots (58)$$

e) 滲透量的測定：灌溉前在畦溝的首、中、末三

端，利用 (Furrow Method)

求出滲透量，其結果如圖 (32)

$$\begin{cases} \text{首端 } d = 4.2t^{0.54} \\ \text{中端 } d = 3.8t^{0.69} \\ \text{末端 } d = 5.4t^{0.48} \end{cases} \text{ 平均 } D = 4.42t^{0.57} \dots (59)$$

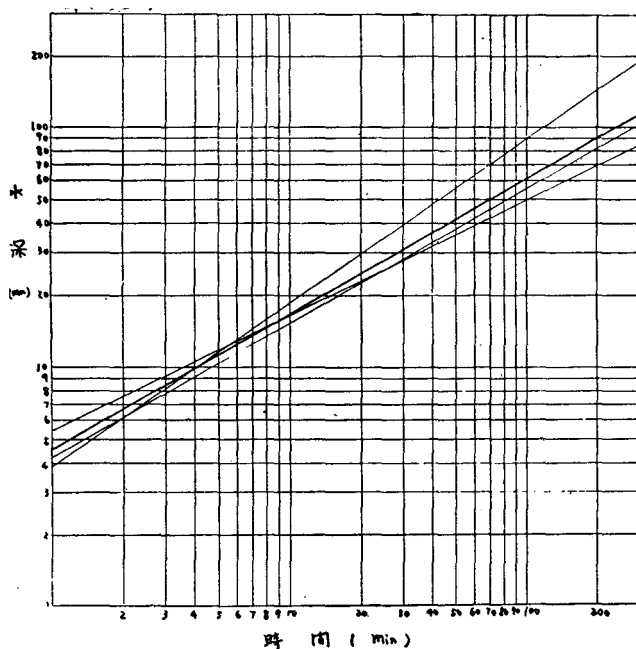


圖 30

從 d) 與 e) 的實驗式可知

$$\begin{cases} t = ac^b Q^c = 0.0545 C^{1.50} Q^{-0.70} \\ d = xt^n = 4.42t^{0.57} \end{cases}$$

所以水足的前進式及滲透式的各係數為：

$$\begin{cases} a = 0.0545 \\ b = 1.50 \\ c = -0.70 \\ x = 4.42 \\ n = 0.57 \end{cases}$$

將此係數代入 (35)，(27)，(36)，(30) 式，則各灌溉式可以

求出。

(a) 水適用灌溉 圖 (31)，(32)

$$\begin{cases} Q \leq 0.1055 [(2-E)^{1.75} - E^{1.75}]^{-0.625} d^{0.78} \\ L = 1.226 Q^{1.10} [(2-E)^{1.75} - E^{1.75}]^{0.667} d^{1.17} \end{cases} \dots (60)$$

(b) 限制灌溉 圖 (33)，(34)

$$\begin{cases} Q \leq 0.1055 E^{1.75} [1 - (2E-1)^{1.75}]^{-0.625} d^{0.78} \\ L = 1.226 Q^{0.47} E^{-1.17} [1 - (2E-1)^{1.75}]^{0.667} d^{1.17} \end{cases} \dots (61)$$

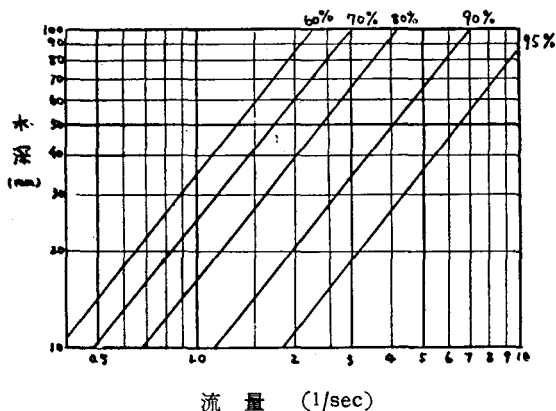
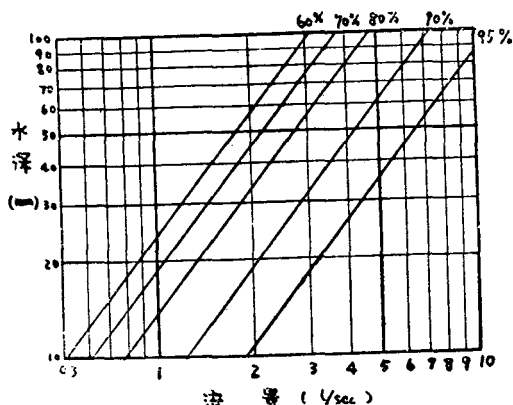


圖 31

$$Q \leq 0.1055[(2-E)^{1.75} - E^{1.75}]^{-0.625} d^{0.76}$$

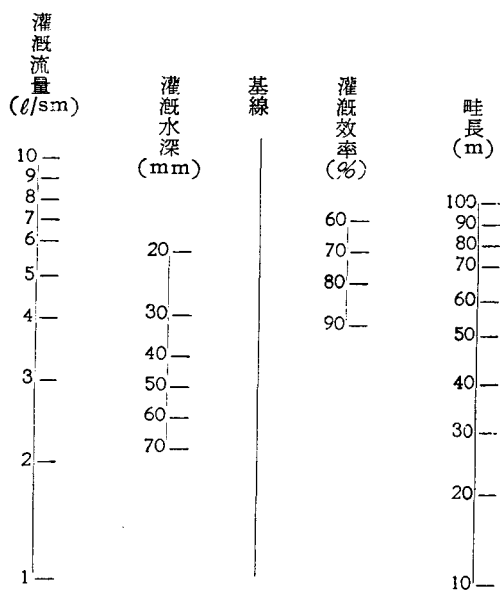
(1)	95%	$Q \leq 0.314d^{0.76}$
(2)	90%	$Q \leq 0.203d^{0.76}$
(3)	80%	$Q \leq 0.132d^{0.76}$
(4)	70%	$Q \leq 0.103d^{0.76}$
(5)	60%	$Q \leq 0.086d^{0.76}$



$$Q \leq 0.1055E^{1.10}[1 - (2E-1)^{1.75}]^{-0.625} d^{0.78}$$

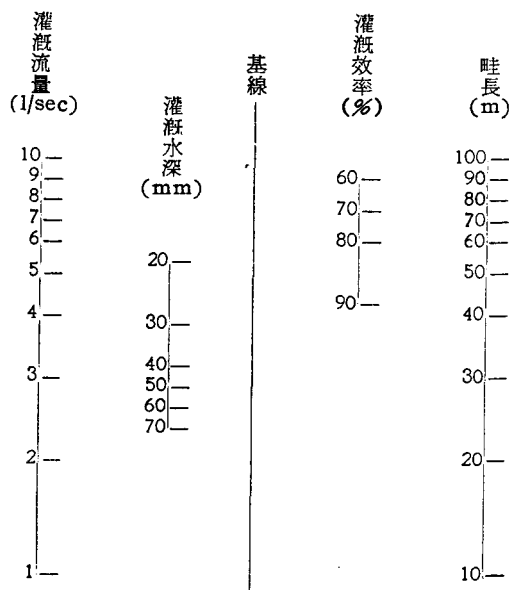
(1)	95%	$Q \leq 0.306d^{0.78}$
(2)	90%	$Q \leq 0.191d^{0.78}$
(3)	80%	$Q \leq 0.115d^{0.78}$
(4)	70%	$Q \leq 0.082d^{0.78}$
(5)	60%	$Q \leq 0.063d^{0.78}$

圖 33



$$L = 1.226Q^{0.47}d^{1.17}[(2-E)^{1.75} - E^{1.75}]^{0.667}$$

圖 32



$$L = 1.22tQ^{0.47}E^{-1.17}d^{1.17}[1 - (2E-1)^{1.75}]^{0.667}$$

圖 34

(B) 畦灌法的實施與計算例

對於 50ha 的輪區灌溉。若各區塊的畦長為 150 m，給水路係採用水頭 1m 的 U 型的水路，按置於各區塊的短邊，灌溉係向長邊 150m' 的方向放流，若輪

區的作物為甘藷，計劃灌溉水深為 40mm，灌溉效率預定維持 90%，則其灌溉計劃如下：

a) 從灌溉前的水足流下式及滲透式的測定，來做為此一區域的代表。若引用 (A) 節所測得的為例：

$$\begin{cases} Q \leq 0.1055[(2-E)^{1.75} - E^{1.75}]^{-0.625} d^{0.78} \\ L = 1.226 Q^{0.47} [(2-E)^{1.75} - E^{1.75}]^{0.687} d^{1.17} \end{cases}$$

b) 適宜畦長的決定

①水頭 1m 的 U 型水路，用 2.5'' 的虹吸管導水，如圖(21)，則直接導入區塊的流量為 8.6ℓ/sec。

②計劃灌溉水深 40mm 與計劃灌溉效率 90% 代入(2)式，可以決定畦溝灌溉的流量。這可從圖(31)的圖表簡單的查出。單位畦溝的最大流量為 3.62ℓ/sec。

③虹吸管的導水量為 8.6ℓ/sec，一次同時放流的畦溝數為 $(8.6 \div 3.62 = 2.38)$ 3 隻。也就是說一條畦溝的分配流量為 $8.6 \div 3 = 2.9\ell/\text{sec}$ 。

畦溝的流量為 2.9ℓ/sec，灌溉水深為 40mm 灌溉效率 90% 代入(2)式，來決定最高畦長，此項計算可由圖(32)的表查出 A pattern 以適當畦長為 76m。

⑤ A pattern 的灌溉時間可由 (3) 式算出：

$$t = \frac{0.01667 w \cdot d \cdot c}{Q}$$

t 灌溉時間 (mm)

w 灌溉寬 (m)

d 灌溉水深 (mm)

L 畦長 (m)

Q 流量 (ℓ/sec)

爲了應用上的方便，可以將(3)式用圖(35)來表示，A pattern 的畦長為 76m，灌溉寬度為 3.3m，灌溉水深為 40mm，流量為 8.6ℓ/sec，則灌溉時間為 19.2 分鐘。

⑥使用 4'' 的虹吸管輸水，如圖(24)，經 76m 管路的流出量為 6.2ℓ/sec，每一畦溝的分配流量為 $6.2 \div 3 = 2.07\ell/\text{sec}$ 。由於此流量比最大使用流量 3.62ℓ/sec 小，足可維持 90% 以上的效率。所以代入(2)式可得 2.07ℓ/sec 的流量最適宜的畦長為 64m。但是 B pattern 的灌溉時間必須同 A pattern 的 19.2 分一致，所以實際的水量計算出來的畦長從圖(35)，可限制為 54m。

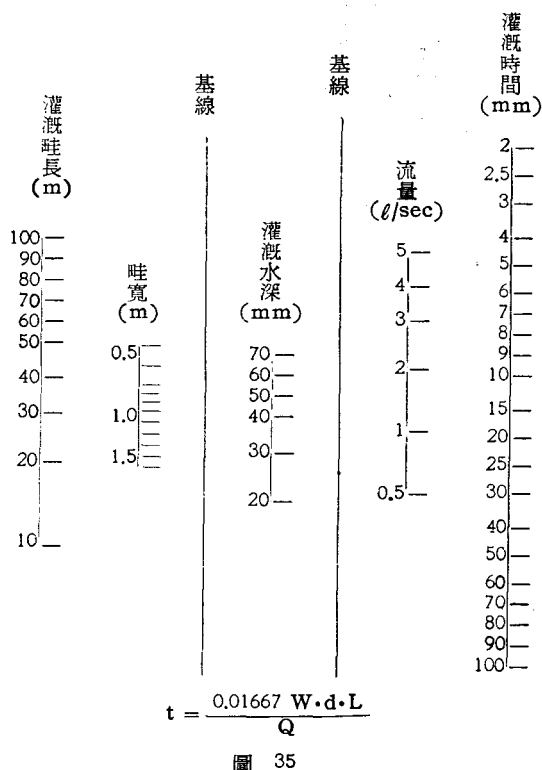


圖 35

⑦在此，A，B pattern 的畦長合計 76m + 54m = 130m，而區劃的實際長度為 150m

$$R = L - \Sigma LA = 150 - 130 = 20$$

所以餘量的分配

$$\begin{aligned} K &= 1 + \frac{L - \Sigma LA}{\Sigma LA} \\ &= 1 + \frac{20}{130} = 1.154 \end{aligned}$$

實際畦長的決定法：

A pattern 的畦長為

$$76m \times K = 76 \times 1.154 = 88m$$

B pattern 的畦長為

$$54m \times K = 54 \times 1.154 = 62m$$

⑧從上項的畦長，重新求出各 pattern 的灌溉時間，則灌溉結果及效率的檢討可列如表(17)。

表 17

Pattern	畦長 (m)	輸水管之流量 (ℓ/sec)	一次灌溉畦數	單溝流量 (ℓ/sec)	各Pattern灌溉時間 (min)	灌溉水深 (mm)	維持90%的效率畦長 (m)	各Pattern之效率 (%)
A	88	8.6	3	2.9	22.3	39.8	76	87.5
B	62	6.1	3	2.03	22.3	40.1	64	90.0
計	150	14.7	6	—	—	39.9	—	88.7

c) 畦溝灌溉的實施

如圖(36)，各區塊將 150m 的畦長分成 2 個 pattern 灌溉操作分 A.B pattern 各一組，灌溉時間各為 22.3 分鐘，由末端開始灌溉。

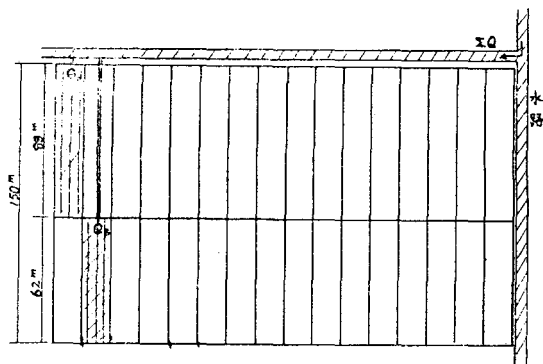


圖 36

灌溉係 A.B pattern 同時進行，流量為 14.7 ℓ /sec 呈安定狀態。要若 50ha 的輪區分二個組進行灌溉，則從 Check gate ($14.7 \times 2 = 29.4 \ell$ /sec) 導入 29.4 ℓ /sec 的定流量就可。

至於全灌區的灌溉時間

$$\frac{50 \times 100 \times 100 \times 0.04}{0.0147 \times 2} = 680273 \text{sec} = 188 \text{時} 57.9 \text{分}$$

所以加上水路的殘留量，輪區的灌溉，可從 Check gate 固定地導入 29.4 ℓ /sec，在一定的時間（189 小時）內達到接近預定效率的灌溉結果。

2 田埂間灌溉 (Border Irrigation)

(A) 有關田埂間灌溉的觀測

a) 觀測地域的土壤性質 (Soil Texture) 與土壤常數：表(18)

表 18

土壤深度 (cm)	土壤質地	假比重	水分當量 (%)		凋萎點 (%)
			離心機法	$\frac{1}{3}$ Atm	
0 ~ 20	砂壤土	1.57	12.43	14.28	3.32
20 ~ 40	砂質粘壤土	1.54	15.60	15.12	4.52
40 ~ 60	粘土	1.28	31.13	32.68	12.40

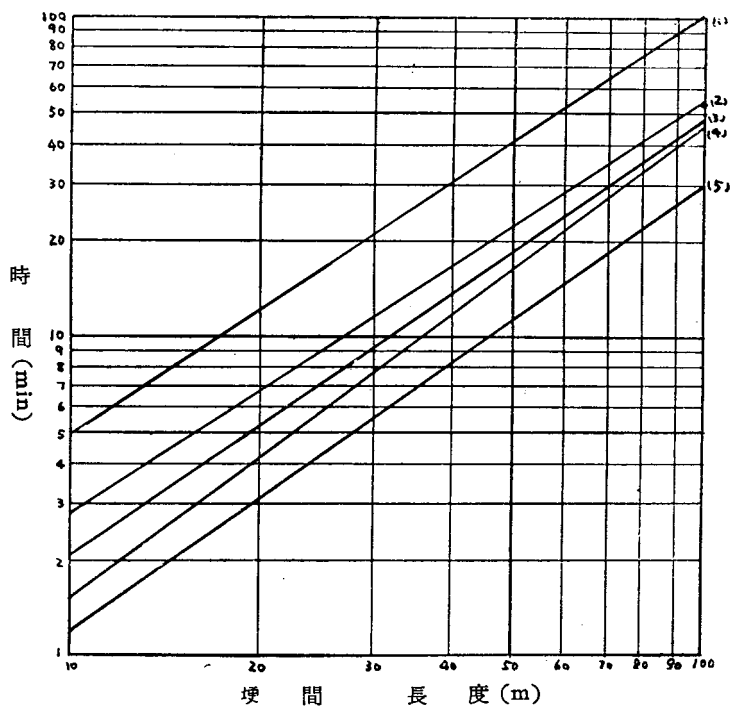
b) 耕種狀態：耕地係無坡度的輪作田，在水稻收割後，用耕牛犁成田埂間，灌溉時無栽種作物，係整地後的灌溉。

c) 有關水足流下式的觀測：在不同寬度的田埂間 (Border Strip)，用不同的流量，測定流下距離與時間的關係，列如表(19)及圖(37)

表 19

流 量 (ℓ/sec)	時 間 (min)	1	2	6	10	16	20	22			前 進 曲 線	
Q/W=6.5	流 距 (m)	W=4.0	8.2	15.4	35.0	49.0	65.2	75.1	78.1		T=0.049 L ^{1.392}	
		W=5.0	7.0	11.3	31.7	43.9	63.8	73.4	76.8		T=0.048 L ^{1.406}	
		平 均	7.6	13.3	33.3	46.5	64.5	74.3	77.5		T=0.048 L ^{1.394}	
Q/W=5.0	時 間 (min)	1	3	5	10	15	20	24	30	34		
	流 距 (m)	W=4.0	6.0	14.8	20.4	33.8	42.2	52.7	65.2	74.3	76.6	T=0.078 L ^{1.398}
		W=6.0	7.0	18.2	26.2	40.3	52.5	64.0	72.0	83.0		T=0.033 L ^{1.544}
		W=7.0	6.7	15.5	20.6	32.3	42.6	53.5	62.5	71.7		T=0.046 L ^{1.521}
		平 均	6.6	16.2	22.4	35.5	45.8	56.7	66.6	76.3		T=0.049 L ^{1.488}
Q/W=4.0 W=7.0	時 間 (min)	1	3	5	10	15	24	30	34			
	流 距 (m)	7.6	14.5	21.5	33.7	43.4	61.2	70.4	78.4		T=0.050 L ^{1.502}	
	時 間 (min)	2	4	6	10	16	20	24	27			
	流 距 (m)	9.0	15.0	22.1	33.3	49.9	58.7	67.7	73.3		T=0.139 L ^{1.221}	
	平 均										T=0.089 L ^{1.362}	

Q/W=3.0 W=7.0	時 (min) 間	2	4	7	15	20	25	30	40		
	流 (m) 距	7.1	12.7	18.4	24.4	46.0	54.0	62.9	77.1		T=0.157 L ^{1.267}
	時 (min) 間	2	4	6	10	14	20	30	40		
	流 (m) 距	7.9	13.7	27.7	33.8	38.0	46.1	62.6	78.3		T=0.131 L ^{1.814}
	平 均										T=0.143 L ^{1.290}
Q/W=2.0 W=7.0	時 (min) 間	2	5	12	20	30	40	50	60	70	
	流 (m) 距	4.3	8.8	17.9	25.9	34.8	41.8	52.7	71.5	77.4	T=0.317 L ^{1.275}
	時 (min) 間	2	5	10	20	30	40	50			
	流 (m) 距	7.0	15.0	25.4	41.2	52.5	62.6	74.5			T=0.125 L ^{1.878}
	平 均	5.6	11.8		33.5	43.6	52.2	63.6			T=0.20 L ^{1.327}



No.	流量 (Q/W)	流 下 式
(1)	2	T=0.20 L ^{1.327}
(2)	3	T=0.143 L ^{1.290}
(3)	4	T=0.089 L ^{1.862}
(4)	5	T=0.049 L ^{1.422}
(5)	6.5	T=0.048 L ^{1.394}

圖 37

d) 接表 (19) 的數據、時間、距離、流量三者的關係用最小二乘法來決定

$$t = 0.338 L^{1.376} Q^{-0.997} \dots\dots\dots (64)$$

e) 滲透式，此一地區係壤土，所以採用

$$d = 8.6 t^{0.69} \dots\dots\dots (65)$$

f) 從(64)及(65)式，流下式及滲透量的各係數為：

$$\begin{cases} a=0.338 \\ b=1.376 \\ c=-0.997 \\ x=8.6 \\ b=0.63 \end{cases}$$

若將各係數值代入(35)，(27)，(36)，(30)，，則各灌溉式可決定下來。

(a)水通用灌溉時：圖(38)·(39)

$$\begin{cases} Q \leq 1.94 \times Q^{-1} [(2-E)^{1.59} - E^{1.59}]^{0.993} \\ d^{2.05} \dots \dots \dots (66) \\ L = 0.462 Q^{0.724} d^{1.154} [(2-E)^{1.59} \\ - E^{1.59}]^{0.726} \dots \dots \dots (67) \end{cases}$$

(b)限制灌溉時：圖(40)，(41)

$$\begin{cases} Q \leq 1.94 \times 10^{-4} E^{1.59} [1 - (2E-1)^{1.59}]^{0.993} \\ d^{2.05} \dots \dots \dots (68) \\ L = 0.462 \cdot Q^{0.724} d^{1.154} E^{-1.154} [1 - \\ (2E-1)^{1.59}]^{0.726} \dots \dots \dots (69) \end{cases}$$

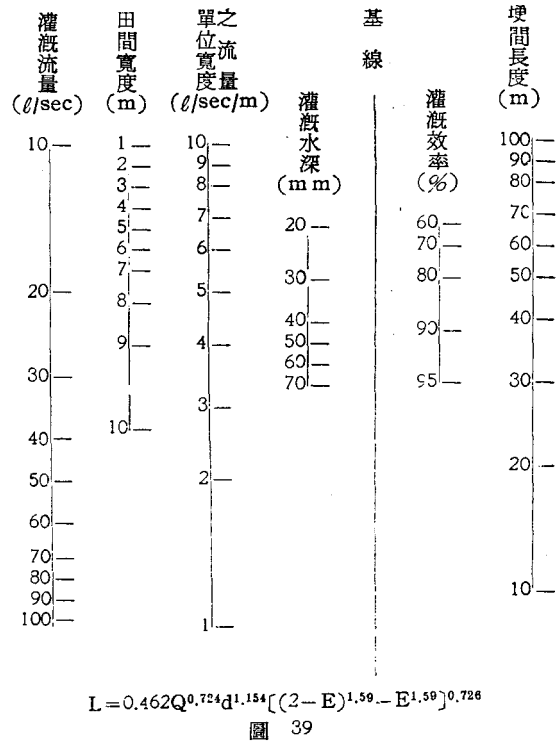
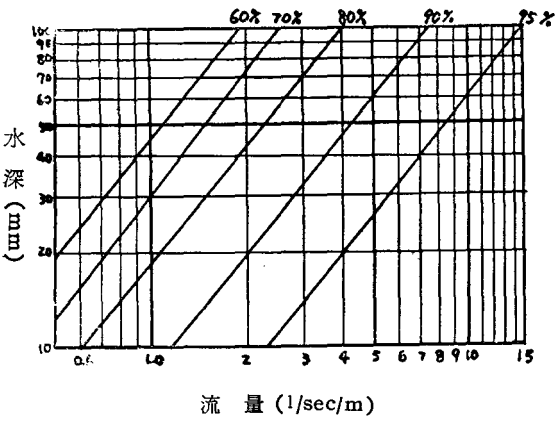


圖 39

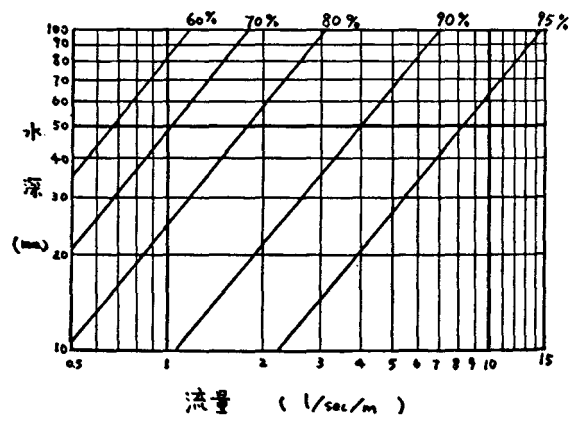


流量 (l/sec/m)

$$Q \leq 1.94 \times 10^{-4} [(2-E)^{1.59} - E^{1.59}]^{0.993} d^{2.05}$$

- 95% $Q \leq 1.20 \times 10^{-3} d^{2.05}$
- 90% $Q \leq 0.61 \times 10^{-3} d^{2.05}$
- 80% $Q \leq 0.32 \times 10^{-3} d^{2.05}$
- 70% $Q \leq 0.20 \times 10^{-3} d^{2.05}$
- 60% $Q \leq 0.15 \times 10^{-3} d^{2.05}$

圖 38

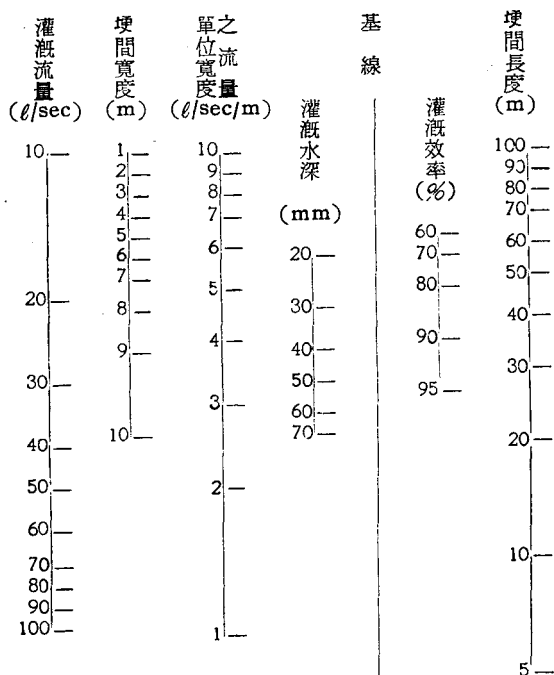


流量 (l/sec/m)

$$Q \leq 1.94 \times 10^{-4} E^{1.59} [1 - (2E-1)^{1.59}]^{0.993} d^{2.05}$$

- 95% $Q \leq 1.145 \times 10^{-3} d^{2.05}$
- 90% $Q \leq 0.545 \times 10^{-3} d^{2.05}$
- 80% $Q \leq 0.244 \times 10^{-3} d^{2.05}$
- 70% $Q \leq 0.144 \times 10^{-3} d^{2.05}$
- 60% $Q \leq 0.093 \times 10^{-3} d^{2.05}$

圖 40



$$L = 0.462 Q^{0.724} d^{1.154} E^{-1.154} [1 - (2E - 1)^{1.59}]^{0.726}$$

圖 41

(B) 田埂間寬度的決定法

田埂間的灌溉與一般畦溝法不同，寬度(Border Strip)並無固定。所以在管理上，寬度過大則很難控制田埂間水足的均一前進。另一方面，田埂間發生侵蝕的流量上限。一般田埂間的寬度是盡可能放大，來節省灌溉的勞動。根據嘉南地區的調查，農民1人可以控制的適宜田埂間寬度為約7m。

對於灌溉實施，為了滿足農民的要求，灌溉時間最少必須要在水足流達末端始行停水。也就是說，在灌溉時間內，讓水量蓋滿全田區。所以使用的流量過大而水量一定的話，灌溉時間會相對的縮短，而無法維持水足流達末端即須停水。因此對單位寬的使用流量是必須加以限制。而田埂間的寬度也可隨着流量來定。

田埂間寬度的決定方法。按計劃的灌溉水深及效率代入下式

$$Q = 0.01667 \frac{b}{b+c} a^{\frac{-1}{b+c}} x^{\frac{b-1}{n(b+c)}} [(2-E)^{\frac{1}{n}} - E^{\frac{1}{n}}]^{\frac{-(b-1)}{b+c} \frac{nb-b+1}{n(b+c)}}$$

可決定單位田埂間寬的流量範圍。若要供給流量為 Q_0 。則

$$Q_0 \div Q = W$$

Q_0 給水路的流入量 (l/sec)

Q 單位寬的最大使用流量 (l/sec/m)

W 最小 Border 寬 (m)

給水流是過大，使得最小田埂間寬 (W) 超過入

為的管理界限的8m。則將給水量分成二個 Border Stripe 來實施灌溉，主要的目的仍在 Border Wide 要小於管理界限的8m以下。

(c) 田埂間灌溉的實施與計算例

如同畦灌法，在50公頃的輪區實施田埂間灌溉區塊內 Border Stripe 的長度為150m

給水路：水頭1m的U型水路

給水方式：4"及2.5"的虹吸管及塑膠管路

計劃灌溉水深：40mm (包括灌溉損失)

計劃灌溉效率：90% (採用水通用灌溉效率)。

灌溉式

$$\begin{cases} Q \leq 1.94 \times 10^{-4} [(2-E)^{1.59} - E^{1.59}]^{-0.993} b^{2.05} \dots\dots\dots (66) \\ L = 0.462 Q^{0.724} [(2-E)^{1.59} - E^{1.95}]^{0.726} d^{1.154} \dots\dots\dots (67) \end{cases}$$

灌溉計劃

a) Border Wide 的決定

① 計劃灌溉水深40mm與計算灌溉效率90%代入(66)式單位流量的最大值可由圖(38)

$$Q_{\max} = 3.55 \text{ l/sec}$$

② 水頭1m的U型水路用虹吸管導入的流量為8.6l/sec [圖(21)]

$$8.6 \text{ l/sec} \div 3.55 \text{ l/sec} = 2.43 \text{ (m)}$$

也就是說 Border Wide 的最小寬度為2.43m。實際的應用上，可以取用較大的寬度。若定 Border Wide 為4m，則A pattern的單位流量為

$$8.6 \text{ l/sec} \div 4 \text{ m} = 2.15 \text{ l/sec/m}$$

b) Border length 的決定

① 2.15l/sec/m的流量，灌溉水深40mm及灌溉效率90%代入(67)式，則最適宜的 Border長，可定。此項計算，可由圖(38)查出 Border長為24.5m，至於 pattern A 的灌溉時間為

$$t = \frac{W L d}{Q} = \frac{4 \times 24.5 \times 0.04}{0.0086} = 455 \text{ (sec)}$$

② 24.5m的距離用4吋的管路輸水，如圖(26)流量為11l/sec，所以B pattern的畦長為。

$$L_B = \frac{tQ}{Wd} = \frac{455 \times 0.011}{4 \times 0.04} = 28.4 \text{ (m)}$$

③ 從水路到C pattern的距離 $L_C = L_A + L_B = \Sigma L_A$

$\Sigma L_A = 24.5 + 28.4 = 52.9 \text{ m}$ ，按照圖(24)查出52.9m的流量為7.5l/sec $L_C = 21.2 \text{ m}$ 。

④ 同法

D pattern $Q = 6.7 \text{ l/sec}$ $L_D = 19.3 \text{ m}$

E pattern $Q = 5.9 \text{ l/sec}$ $L_E = 16.7 \text{ m}$

F pattern $Q = 5.5 \text{ l/sec}$ $L_F = 15.6 \text{ m}$

G pattern $Q = 5.1 \text{ l/sec}$ $L_G = 14.4 \text{ m}$

⑤在此 $\Sigma L_A = 140.1\text{m}$ ，而實際的 Border length 為 150m ，餘量 R 的分配用 (55) 式

$$K = 1 + \frac{L - \Sigma L_A}{\Sigma L_A} = 1 + \frac{150 - 140.1}{140.1} = 1.07$$

將各 pattern 乘於 K 值，適當的將 9.9m 剩餘量分配之。

⑥從決定下來的各 pattern 的畦長，再重新計算其灌溉時間，並檢討其效率如表 20。

表 20

Pattern	畦長 (m)	流量 (ℓ/sec)	埂間寬度 (m)	灌溉時間 (min)	各 Pattern 之 灌溉水深 (mm)	各 Pattern 灌溉效率 (%)
A	26.0	8.6	4.0	8.13	40.4	90
B	30.5	10.6	4.0	8.13	42.3	91
C	23.0	7.5	4.0	8.13	39.8	90
D	20.5	6.4	4.0	8.13	38.1	90
E	18.0	5.7	4.0	8.13	38.6	91
F	16.5	5.3	4.0	8.13	39.2	91
G	15.5	5.0	4.0	8.13	39.4	92
計	150.0	49.1	—	8.13	40.0	90.5

150m 的區塊，田埂間的長度，可按表 20 的分配分成 7 個 pattern。灌溉是 A·B·C···G 七組同時進行，各 pattern 的灌溉時間為 8.13 分，至於灌

溉水量 7 組合計共為 $49.1\ell/\text{sec}$ 所以可從 Check gate 導入定流量 ($49.1 +$ 輸水損失) 即可達到灌溉的目的。田區的分佈如圖 42

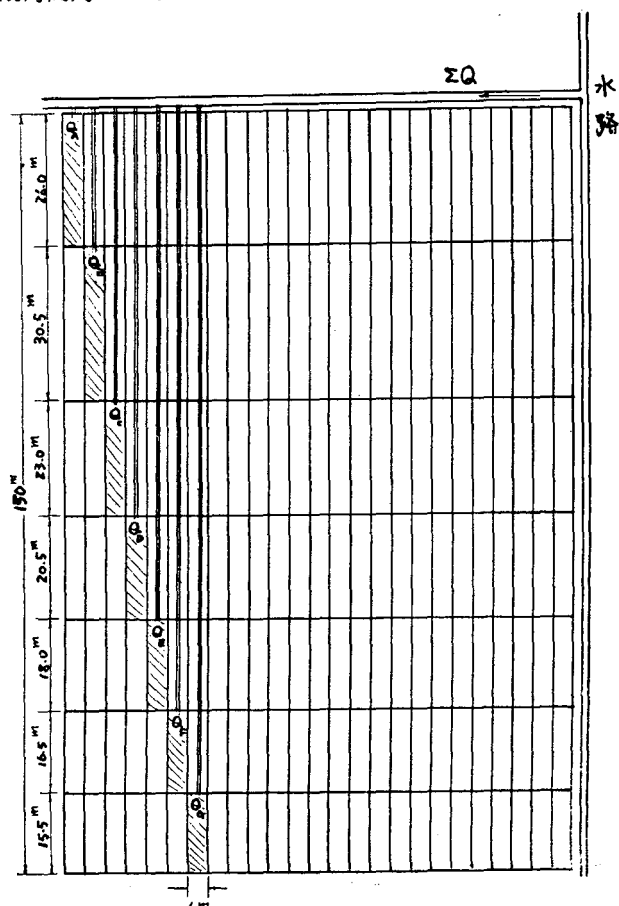


圖 42

全輪區的灌溉時間可用下式：

$$t = \frac{50 \times 100 \times 100 \times 0.04}{0.0491} = 407332(\text{sec}) \\ = 113\text{時}8.9\text{分}$$

求得全輪區的灌溉時間。

(3)討論

若具備如上所述的條件，畦灌法及田埂間灌法，對畦長一定的 50ha 的輪區單位，將一定流量在時間內導入輪區，即可達到均一灌溉的目的。

對於灌溉式的適用性，隨著作物的種類、土性及耕作方式而異，因此在灌溉前，按各輪區，將滲透量及流下式分別加以測定，則可導出代表區域性的灌溉式，但是平坦地的灌溉式之演算較為繁雜，所以靠人力在短期間演算的話，實有困難，故將數據的處理，適當的加以 Programing，而利用電子計算機來處理的話，即可迅速地獲得欲定的灌溉式。

對於灌溉實施計劃，必須把全盤的操作規則化。使得農民能對此一新灌溉方法能有淺顯的瞭解與使用。

但是以上的方法，仍只能應用在區塊整齊的重劃田，及有健全的水路設施之耕地。對於未土地重劃的地區，要實施旱水田輪作，各區塊的面積不一，灌溉時間也隨著區塊的大小而不同。因此在操作上，會有很大的困難，尤其是對於旱作灌溉，畦長不均的話，無法按畦長分成一定的 Pattern，因此灌溉的實施計劃，如稻作的灌溉，按面積配水，以區塊為中心，在區塊內定出各自的流長。至於全輪區的灌溉，如同稻作的灌溉，還得從 Check gate 導入一定的流量，由灌溉水深及面積來定的時間內，實施灌溉。

由於水路過低，無法保持旱作灌溉所需要的水頭，則可同水稻的灌溉，使用定量定時的灌溉，輸送水量至各區塊，由各區塊內利用抽水機實施區內的旱作灌溉。

摘要與結論

輪作田不像一般單純之水田或旱田，因此耕地有時為水田，有時為旱田兩者輪植利用，故其水利施設對於水田或旱田，必須有不同之特別構造物與管理方法。為達到輪作田灌溉能順利實施，應就下列三問題加以檢討。

1) 配水計劃，為使幹線水路較易保持一定流量起見，對末端的給水系統之輪區，在取水期間，應於 Check gate 以定流量在輪區內實施輪流配水。

2) 末端水路的構造及佈置，應改善為旱水田均能兼用，尤其對旱田灌溉所需之水頭需要考慮，且旱作灌溉不能像水田實施越田續灌，故應設置各地區別單獨能灌溉之給水路。

3) 田區內的灌溉，應使水田或旱田均能正確的施灌，亦即以一定之流量，在計劃時間內按照計劃灌溉效率，能正確的執行。

輪作田的旱作灌溉是以田畦間法或溝灌法為主，但因田面缺乏坡度，流速較一般旱田灌溉緩慢，且耕地地區塊面積過大，畦長達 100 公尺以上，按作物必要水量配水不能達到計劃灌溉效率。目前對輪作田之旱作灌溉，並未確立一定的標準方法。一般通用的旱作灌溉法，如美國農業土木手冊的旱灌公式：

$$Q < \frac{10}{S}$$

$$L = \frac{1000}{(I-A) \cdot W \cdot S}$$

式中：Q：畦溝最大流量 (gpm)

S：畦溝坡度 (%)

I：灌溉前降雨強度 (in/hr)

A：土壤滲透率 (in/hr)

W：畦溝寬 (ft)

L：畦長 (ft)

上式係具有坡度之耕地始能應用，不適用於平坦的輪作田。因此本論文針對平坦旱田之灌溉為對象，研究畦灌與田埂間灌溉之新計算式：

$$Q \leq (0.01667W)^{\frac{b}{b+c}} a^{\frac{-1}{b+c}} x^{\frac{b-1}{n(b+c)}}$$

$$\left[(2-E)^{\frac{1}{n}} - E^{\frac{1}{n}} \right]^{\frac{-(b-1)}{b+c} d^{\frac{nt-t+1}{n(b+c)}}}$$

$$L = \left\{ \frac{1}{aQ^c} \left(\frac{d}{x} \right)^{\frac{1}{n}} \left[(2-E)^{\frac{1}{n}} - E^{\frac{1}{n}} \right] \right\}^{-\frac{1}{b}}$$

式中 Q：流量 (ℓ/sec)

W：灌溉畦溝寬 (m)

a.b.c：水足的流下係數

x.n：滲透係數

E：灌溉效率 (%/100)

d：灌溉水深 (mm)

L：灌溉畦長 (m)

本公式係依據灌溉效率、水深、水足流下式、與滲透式等所導出的。公式的應用，在灌溉前觀測水足的流下式與滲透式，即可計算出適當的流量範圍及畦長。公式的計算雖異常繁雜，然利用電子計算機的處理，即可簡單的算出。另外在現場應用時，若將灌溉

公式加以圖表化，則農民亦可簡便利用。

輪區內末端給水土渠的改善，若將既有之梯形斷面加以施設內面工防止輸水損失之方法改為採用U型水槽渠道，不但可達到內面工防止輸水損失之目的，而能確保旱作灌溉所需之水頭，且採用U型水槽渠道可節省水路用地，還可將既有梯型水路側邊的2公尺小型農路，可一律擴張至4.5公尺。本論文所提的農路改善方法中，可將梯型水路崩塌的土方，作為農路擴建時的基礎用土。其外築造新農路時用地收購問題之麻煩可免發生。在戰後的日本農業機械化而擴張農路的先例，目前我國正在推廣農業機械化，為了這個機械化的需要農路的擴張是必要的。

依本論文所介紹之新灌溉公式與管理法，灌溉可以在一定水量及所限時間內順利執行，而不受田面平坦和畦過長的影響，按田埂間灌溉法及畦灌法，達到計劃灌溉效率的目的。

要達成灌溉效果，必得先有適當的灌溉計劃，這不僅依賴水庫建設來確保水源，更需要將確保的水量如何妥善的有效利用為重要之課題，現在對嘉南平原的灌溉問題，正在建設貯水量8億9千萬噸之曾文水庫，故今後輪作田的旱作灌溉即可得到新水源，因此為實施有效灌溉特別強調上述的末端水路改善及新的灌溉方法。

今後若輪作田灌溉能全面實施，確信對臺灣糧食增產必有很大的貢獻。

參 考 文 獻

- 1) 山崎不二夫、長谷川新一：
畑地かんがい 農文協 1959
- 2) 種田行男：
畑地かんがい 理工圖書 1958
- 3) 張建勛、徐玉標、施嘉昌、甘俊二：
嘉南地區及臺大旱作灌溉報告 臺灣大學 1964
- 4) Kent. F. Chang & Y. S. Shu：
Upland Crops Irrigation Experiments in Taiwan N. T. U. 1962
- 5) 猿渡良一：
臺灣における畑地灌溉改善の方法について 海外技術協力事業團 1966
- 6) 臺灣省政府農林廳：
農田水利 農業要覽第三輯 1958
- 7) 張建勛：
臺灣旱地作物灌溉之研究及推行 臺大農學院26號 1966
- 8) 蔡 崔 源：
嘉南平原的灌溉問題 臺大農學院25號 1965
- 9) 甘 俊 二：
臺灣の自然環境と作物，家畜の分布 アジア經濟研究所 1967
- 10) 吳 耀 煌：
臺灣農業と畑地カンガイの概要 農業土木第207號 1967
- 11) 牧 隆 泰：
臺灣における農業土木の進展と農業土木技術者の足跡 農業土木研究27卷5號
- 12) 紀聯東、蔡崔源、曾金億：
嘉南地區旱作灌溉概況 嘉南水利會 1966
- 13) 嘉南水利會：
臺灣省嘉南大圳水利委員會事業概況 嘉南水利會 1955
- 14) Houk：
Irrigation Engineering Volume I
- 15) 張 建 勛：
灌溉與排水學： 正中書局 1957
- 16) 牧 隆 泰：
半世紀間臺灣農業水利大觀 臺灣水利組聯合會 1943
- 17) 吉良芳夫：
田畑輪換 農業土木31卷2號
- 18) 臺灣省水利局：
臺灣省灌溉普查 水利局 1965
- 19) C. B. Richey：
Agricultural Engineers' Handbook Mc Graw-Hill 1961
- 20) 大島一志：
畑地カンガイの計劃と設計 畑地農業 1963
- 21) 千葉縣耕地圖：
畑地カンガイ試驗報告書
- 22) 張 果 爲：
統計方法新論 臺灣大學 1957
- 23) 甘 俊 二：
嘉南區域灌溉方法予備試驗 中國農工學報10卷23號 1964
- 24) 張建勛、甘俊二、蔡崔源、曾金億：
嘉南學甲旱作灌溉試驗報告 嘉南水利會 1965
- 25) 吳 耀 煌：
畦溝灌溉之研討 中國農工學報特刊 1965
- 26) 黃 金 全：
旱地灌溉效率之研究

- 27) 吳純宏：
埤畦灌溉方法之研討 中國農工學會 1965
- 28) 福田仁志：
灌溉分水論 地球出版 1962
- 29) 玉井虎太郎：
土壤有效水の性格と畑地かんがい
畑地かんがい15號 1959
- 30) Yu-si Fok & Alvin Bishop：
Analysis of Water advance in Surface
Irrigation
A. S. C. E Irrigation & Drainage Division
1965
- 31) James E Mimerly：
Design of Furrow Irrigation System for
Sugar Cane
A. S. A. E. No. 62-225
- 32) Charle c.c. Shih：
The Influence of Intake Function on the
Mathematic Modal of the water Advance
Function For Surface Irrigation
UTAH State university 1966
- 33) 畑地カンガイ研究會：
愛知用水その事業の意義
- 34) 小倉金之助：
計算圖表 岩波全書
- 35) 茨城大學農學部：
鹿島南部地區畑地カンガイ試験報告書 1960
- 36) 嘉南水利會：
嘉南大圳灌溉渠道內面工程實施報告 1965
- 37) 山崎不二夫：
農地造成 1958
- 38) 椿東一郎、荒木正夫：
水理學演習 1965
- 39) 新澤嘉芽統 小出進：
耕地の區劃整理 岩波書店
- 40) 狩野徳太郎：
農業土木講座(1)カンガイ排水
朝倉書店
- 41) 椎名乾治：
耐壓ホース利用の新しい畑地カンガイ
畑地農業 1966
- 42) 張建勛、甘俊二：
嘉南地區旱作灌溉農友須知
嘉南水利會 1965
- 43) Tsai Tsui-Yuan：
Rotational Irrigation Practice
嘉南水利會 1964
- 44) 王道隆、徐田璋：
臺灣的灌溉事業與輪流灌溉制度
農業土木學會41年度年會
- 45) 嘉南水利會：
嘉南地區輪灌改善工程實施概況及輪灌計劃
實例 1965年
- 46) 臺灣水利局：
臺灣水利建設 水利局 1967
- 47) 蔡 崔 源：
臺灣農田水利經營 嘉南水利會 1964
- 48) 福田仁志 鈴木重義：
カンガイ水路の夜間貯水
水溫の研究9卷2號 1965
- 49) 藤井正二：
循環式カンガイ法 富山新湊市役所 1966
- 50) 千葉 縣：
縣營園場整備事業計劃概要書 1966
- 51) 神奈川農政部耕地課：
神奈川縣相模原開發畑地カンガイ技術史
- 52) 甘 俊 二：
臺灣の農業技術 アジア經濟研究所 1967
- 53) 愛知用水公園：
愛知用水管理事業概要 1966
- 54) 蔡崔源、曾金億、吳純宏：
嘉南新港旱作灌溉實驗站工作報告
嘉南水利會 1967
- 55) 福田仁志、甘俊二：
臺灣の水稻輪流カンガイとその效果
農土誌35卷7號
- 56) 張建勛、徐玉標、葉政秀、黃卷重：
嘉南學甲地區旱作灌溉研究試驗報告(54)
嘉南水利會 1966
- 57) D. G. Shockley, H. J. Woodward & J. T.
Phelan：
Quasi Rotational Method of Border
Irrigation Design
A. S. C. E. No. 63-720