

土壤滲水率及蔗田灌溉用水量之研究

Intake Rate and Irrigation Requirement on Sugar Cane Field

臺灣糖業試驗所農業工程實驗室主任

朱 益 (Yih Chu)

一、說明及概論

本文所用名詞及其含義如下：

(1) 土壤滲水率 (intake rat)：灌溉水滲入土壤之速率。

(2) 灌溉用水量 (field irrigation requirement)：滲入田間之總水量。通稱之逕流損失，亦即灌溉後之尾水 (tail water)，因仍可利用，未包括在內。

(3) 可用水量 (useful water) 灌溉水貯留根區土壤，可被作物利用之部份。

(4) 滲漏耗損 (percolation loss)：灌溉水滲入根區土壤以下，作物無法利用而損失之部份。

(5) 供水效率 (water applicaton efficiency)：可用水量與灌溉用水量之比。

(6) 足量灌溉點：田間任意點之滲水量全屬可用水量而無滲漏耗損者。

灌溉之目的在補充天然降雨之不足以供作物生長之需，其基本要求為足量 (adequacy) 與均勻 (uniformity)。足量灌溉可使作物不至因缺水而影響其正常生長；均勻灌溉可減低滲漏耗損而免提高灌溉成本。事實上當灌溉水施於田間時，由於畦首與畦尾之浸水時間不同，滲入田畦之水量亦各異；如畦首足量，畦尾必不足；畦尾足量，滲漏耗損必加多。故田畦內各點之滲水量不可能一致。最經濟之灌溉用水量，在使滲入田畦水量能符作物生長之最低需要量，同時田間滲漏耗損為最小；亦即灌溉之供水效率最高。本文先就土壤滲水率及滲水深度之理論分析，與蔗田實測結果對證，以求浸水時間與滲水深度之關係方程式；然後根據此項關係式輔以田間測定灌溉水流前進情形，推算不同流入量 (inflow rate) 灌溉時所需之灌溉時間，灌溉用水量及供水效率。

近三、五年來，臺灣已漸重視經濟灌溉之研究。臺灣大學及嘉南水利會灌區，均先後有具體試驗研究結果，惟其研究對象類屬近似水平之水田或輪作田。

本文各項試驗觀測，在嘉義公館農場 0.4% 之蔗田舉行，以坡地蔗田之灌溉試驗而言，尚屬初次嘗試。其結果雖可供公館沙壤土蔗田灌溉規劃之參考，惟即就壤土蔗田灌溉用水量而論，試驗資料尚嫌不敷，仍賴日後繼續收集研究。

二、土壤滲水率與滲水深度

一、滲水率及其經驗公式：

水及土壤若干特性，諸如水質、土壤之構造 (Structure) 與質地 (texture)，土壤以往乾燥濕潤狀況、施灌時之土壤含水量，均影響滲水率之值。

如不計水質之影響，灌溉水滲入土壤之速率為時間與土壤物理性之函數。就同一類土壤或同一地點而言，在實用上滲水率可視為時間之函數，隨浸水時間增加而減小。如以 i 表滲水率， y 表累計滲水深度， t 表浸水時間，則

$$y = \int_0^t i dt \quad (1)$$

故得滲水深度亦為一時間之函數。

最通用之滲水深度與時間經驗公式有三：

$$y = kt^a \quad (2)$$

$$y = b(i - e^{-rt}) \quad (3)$$

$$y = ct + b(1 - e^{-rt}) \quad (4)$$

式中 k, a, b, r, c 均為常數，其中 a 值介 0 至 1 之間，其餘常數均為正值。式 (2) 通稱 Kostiakov-Lewis 方程式，式 (3) 係 Lewis 與 Milne 於 1938 年提出，式 (4) 為 Horton 型之方程式。微分 (2)

(3) (4) 式，可得相應滲水率方程式如下：

$$i = akt^{a-1} \quad (5)$$

$$i = rbe^{-rt} \quad (6)$$

$$i = c + rbe^{-rt} \quad (7)$$

式 (5) 中 $(a-1)$ 亦為負值。由 (5)，(6) 兩式，可見在 t 值漸大時，滲水率 i 之值將趨於零。此與灌溉水滲入率漸趨一非零定值之事實不符。故採用 (2)，(3) 兩

式時，當 t 值漸大，差誤亦大。Horton 型之(4)式雖無此項差誤，但由於型式上較複雜，灌溉上之應用，較不普遍。上述三式皆屬經驗公式 (empirical formula)。美國農部採用者為(2)式⁽²⁾，臺灣習用者亦為(2)式，現下臺灣大學及嘉南水利會實驗田之灌溉試驗研究，大率採用此式⁽¹³⁾。

二、土壤水流之解析方程式

在非飽和土壤 (unsaturated soil) 內，水之滲流可視為擴散現象。1957，澳人 John philip 根據達賽氏律 (Darcy's Law)，擴散原理 (Principle of diffusion)，及等積律 (Law of continuity) 導行土壤水流公式⁽⁸⁾，並在實驗室予以證實。其公式如下：

$$y = \phi_1 t^{1/2} + \phi_2 t + \phi_3 t^{3/2} + \dots + \phi_n t^{n/2} \quad (8)$$

式中 $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n$ 為土壤始初含水量 (initial water content) 之函數。由於 philip 之研究對土壤以往濕潤乾燥情況視作可略因素，故若在固定之土壤含水量時施灌田畝，則各 ϕ 值均可視作常數。式中各後項 ϕ 值，遠較其前項 ϕ 值為小，一般情形，小達十倍以上，即 $\phi_2 \ll \phi_1, \phi_3 \ll \phi_2, \dots, \phi_n \ll \phi_{n-1}$ 故在 t 為有限值時，式(8)收斂甚速，若僅採二項，則式(8)成爲：

$$y = st^{1/2} + At \quad (9)$$

若施灌前土壤含水量為定值，則式中 S 及 A 均為常數。 S 為毛管力之影響， A 為重力之影響。在 t 值小時，毛管力控制水流，首項之關係較大； t 值較大時，重力控制水流，次項關係較大。當 t 值甚大時，

土壤已近飽和，則水之滲流已非擴散現象。故(9)式在理論上不適用於極大之 t 值。(9)式對灌溉水之入滲計算，尚在嘗試中。在正常情形下，灌溉前之土壤均為非飽和土壤，而灌溉時間復少有極長而使土壤大部份成爲飽和，故(9)式應適用於灌溉。以下將以田間實測滲水率資料，比較經驗公式及(9)式之精確度，以供計算灌溉用水量所需滲水公式之選擇。

三、田間滲水深度之觀測及其分析

蔗田之灌溉以採溝灌爲多，故本試驗滲水深度，採用 furrow infiltrometer⁽¹¹⁾ 量測，即一般習稱之水池法。以鐵板二塊打入灌溉溝，形成內水池。(打入深度爲50公分以上)，池內由給水箱供應水量，以補充土壤水之入滲而維持池內水位。板外兩側以土攔成外水池，隨時加注水量，使外水池水位不低於內水池，而避免內池水沿灌溉溝方向之入滲。觀測時間及給水箱水位讀數，俾折算蔗田滲水深度。水之入滲速率原與水池水深有關，但在非飽和土壤，當水頭在200公分以下時，每公分水頭對入滲速率之影響僅1~2%⁽⁹⁾，一般灌溉溝水深約在5公分左右，其間之差別不大，故假定水頭對滲水率之影響可從略不計。

本試驗觀測二組，其內水池水深分別爲3公分及5公分。試驗前先測定土壤含水量，滲水深度由給水箱水位之下降度以水池浸水面積換算之。在觀測初期，因滲水率較大，給水箱未能供應等量之水，一部入滲水量係由水池供應，致內水池水位未能固定，故在內水池水位穩定前，滲水率應加校正。各項記錄與計算視表一甲及表一乙。

(表一甲) 蔗田滲水深度田間測定記錄及計算之一

時 間	累積時間 t	水 箱 水 位 h	水箱水位差 Δh	累計水位差 $\Sigma \Delta h$	相當田面水深 Δy	水池水尺讀數	滲 水 深 度 y
時 分	(分)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
9:18	0	637				899	
9:19	1	630				890	
9:20	2	622	15	15	4.7	889	14.7
9:22	4	597	25	40	12.5	894	17.5
9:23	5	590	7	47	14.6	895	18.6
9:25	7	579	11	58	18.1	896	21.1
9:27	9	570	9	67	20.9	897	22.9
9:30	12	556	14	81	25.2	898	26.2
9:33	15	545	11	92	29.6	898	29.6
9:36	18	533	12	104	32.4	898	33.4

9:38	20	526	7	111	34.5	899	34.5
9:41	23	514	12	123	38.3	"	38.3
9:44	26	503	11	134	41.7	"	41.7
9:48	30	489	14	148	46.6	"	46.6
9:54	36	468	21	169	52.6	"	52.6
9:58	40	456	12	181	56.3	"	56.3
10:03	45	440	16	197	61.3	"	61.3
10:08	50	264	14	211	65.7	"	65.7
10:13	55	409	17	228	71.0	"	71.0
10:18	60	395	14	242	75.3	"	75.3
10:29	71	364	31	273	84.9	"	84.9
10:38	80	339	25	298	92.7	"	92.7
10:49	91	309	30	328	102.0	"	102.0
10:58	100	287	22	350	109.0	"	109.0
11:08	110	261	26	376	117.0	"	117.4
11:18	120	237	24	400	124.6	"	124.6

第①, ③, ⑦三欄為田間紀錄之值, 其餘各欄為計算值

$$\textcircled{6} = \textcircled{5} \times \frac{1010}{3252}$$

$$\textcircled{8} = 899 - \textcircled{7} + \textcircled{6}$$

觀測地點: 嘉義公館農場47行首端

觀測日期: 55年12月 日 土壤類別: 沙壤土 鐵板寬度: 50cm 水面寬度65cm 浸水面積: 3250cm²

水池水深: 3.0cm 給水箱面積: 1010cm²

(表一乙) 蔗田滲水深度田間測定記錄及計算之二

時 間	累計時間 t	水 箱 水 位 h	水 箱 水 位 差 Δh	累 計 水 位 差 ΣΔh	相 當 田 面 水 深 Δy	水 池 水 尺 讀 數	滲 水 深 度 y
時 分	(分)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
2:12	0	496				930	
2:13	1	482				919	
2:14	2	468	28	28	8.3	920	18.3
2:16	4	440	28	56	16.5	924	22.5
2:17	5	429	11	67	19.6	925	24.6
2:19	7	409	20	87	25.7	927	28.7
2:21	9	394	15	102	30.3	929	31.3
2:24	12	378	16	118	34.8	930	34.8
2:27	15	361	17	135	39.8	"	39.8
2:30	18	348	13	148	43.7	"	43.7
2:32	20	339	9	157	46.3	"	46.3
2:36	24	323	16	173	51.0	"	51.0
2:39	27	313	10	183	54.0	"	54.0
2:42	30	303	10	193	57.0	"	57.0
2:47	35	287	16	209	61.4	"	61.4
2:52	40	271	16	225	66.4	"	66.4
2:57	45	255	16	241	71.1	"	71.1

3:02	50	239	16	257	75.8	"	75.8
3:07	55	223	16	273	80.5	"	80.5
3:12	60	209	14	287	84.7	"	84.7
3:22	70	179	30	317	93.5	"	93.5
3:32	80	151	28	345	101.9	"	101.9
3:42	90	121	30	375	110.7	"	110.7
3:52	100	95	26	401	118.2	"	118.2
4:02	110	67	28	429	126.8	"	126.8
4:12	120	40	27	456	134.6	"	134.6
4:18	126	24	16			"	

第①, ③, ⑦三欄為田間記錄值, 其餘各欄為計算值。

$$\textcircled{6} = \textcircled{5} \times \frac{1010}{3410}$$

$$\textcircled{8} = 930 - \textcircled{7} + \textcircled{6}$$

觀測地點：嘉義公館農場47行末端

觀測日期：52年12月 日 鐵板寬度：50.5cm 水面寬度：67.5cm 浸水面積：3410cm² 水池水深：5.0cm

給水箱面積：1010cm²

由表列滲水深度 (y) 與時間 (t) 之相對值, 利用最小誤差法 (minimum error theory), 可分別求得滲水深度與時間關係之經驗公式與解析方程式。

(1) 經驗公式：以臺灣習用之 (2) 式為例：

$$y = kt^a \quad (2)$$

$$\log y = a \log t + \log k$$

$$\text{令 } \log y = Y \quad \log t = T$$

$$\text{則 } Y = aT + \log k$$

設 n 為觀測次數

$$Q = \sum_1^n (Y - aT - \log k)^2 \quad (10)$$

則最小誤差之條件為：

$$\frac{\partial Q}{\partial a} = 0 \quad \frac{\partial Q}{\partial k} = 0 \quad (11)$$

以(10)式代入(11)式, 解之得

$$a = \frac{1}{D_1} (n \sum T_j Y_j - \sum T_j \cdot \sum Y_j) \quad (12)$$

$$\log k = \frac{1}{D_1} [\sum T_j^2 \cdot \sum Y_j - \sum T_j \cdot \sum T_j Y_j] \quad (13)$$

$$\text{式中 } D_1 = n \sum T_j^2 - (\sum T_j)^2 \quad (14)$$

(2) 解析方程式

$$y = St^{1/2} + At \quad (9)$$

$$Q = \sum_1^n (y - St^{1/2} - At)^2 \quad (15)$$

以(15)式代入(11)式, 解之得

$$S = \frac{1}{D} [\sum (t_j)^2 \cdot \sum (t_j^{1/2} y_j) - \sum (t_j^{3/2}) \cdot \sum (t_j y_j)] \quad (16)$$

$$A = \frac{1}{D} [\sum (t_j) \cdot \sum (t_j y_j) - \sum (t_j^{3/2}) \cdot \sum (t_j^{1/2} y_j)] \quad (17)$$

$$\text{式中 } D = (\sum t_j)(\sum t_j^2) - [\sum (t_j^{3/2})]^2 \quad (18)$$

實測資料之計算見表二甲及表二乙, 其結果如下：

$$\text{觀測記錄甲：} y = 7.196t^{0.569} \quad (19a)$$

$$y = 5.89t^{1/2} + 0.50t \quad (19b)$$

$$\text{觀測記錄乙：} y = 10.697t^{0.507} \quad (20a)$$

$$y = 9.00t^{1/2} + 0.28t \quad (20b)$$

將 y 之田間實測值, 與自 t 值從式(19)及(20)所得之 y 計算值, 求其差額 Δy , 計算其中誤差 (mean square error) M, 可比較經驗式與解析式之精確度。詳表三甲及表三乙。

經驗式之中誤差為 5.64mm 及 4.59mm, 解析式之中誤差為 1.58mm 及 1.88mm, 前者遠較後者之誤差為大。各 y 值經繪如圖一甲及圖一乙。由圖示, 解析式之 y 值與觀測值甚為接近, 經驗式偏差 (deviation) 較大, 尤以 t 值大時為然。

表二甲蔗田滲水深度與浸水時間關係式計算之一 嘉義公館農場47行首端

n	t	T	y _m	Y	T ²	TY	y _c
1	2	0.693	14.7	2.688	0.480	1.863	10.67
2	4	1.386	17.5	2.862	1.921	3.967	15.84
3	5	1.609	18.6	2.923	2.589	4.703	18.03
4	7	1.946	21.1	3.049	3.787	5.933	21.78
5	9	2.197	22.9	3.131	4.827	6.879	25.11
6	12	2.485	26.2	3.266	6.175	8.116	29.58
7	15	2.708	29.6	3.388	7.333	9.175	33.59
8	18	2.890	33.4	3.509	8.352	10.141	37.25
9	20	2.996	34.5	3.541	8.976	10.609	40.12
10	23	3.135	38.3	3.645	9.828	11.427	42.85
11	26	3.258	41.7	3.731	10.615	12.156	45.95
12	30	3.401	46.6	3.842	11.567	13.067	49.83
13	36	3.584	52.6	3.963	12.845	14.203	55.27
14	40	3.689	56.3	4.031	13.609	14.870	58.70
15	45	3.807	61.3	4.116	14.493	15.670	62.76
16	50	3.912	65.7	4.185	15.304	16.372	66.66
17	55	4.007	71.0	4.263	16.056	17.082	70.33
18	60	4.094	75.3	4.321	16.761	17.690	73.93
19	71	4.263	84.9	4.441	18.173	18.932	81.34
20	80	4.382	92.7	4.529	19.202	19.846	87.08
21	91	4.511	102.0	4.625	20.349	20.863	93.71
22	100	4.605	109.0	4.691	21.206	21.602	98.87
23	110	4.701	117.0	4.762	22.099	22.386	104.34
24	120	4.787	124.6	4.825	22.915	28.097	109.66
合 計	1,029	79,046	1,357.5	92,327	289,462	320,649	

$$D_1 = 24 \times 289,462 - (79,046)^2 = 698,82$$

$$a = (320,649 \times 24 - 79,046 \times 92,327) / 698,82 = 0,5688$$

$$\log k = (289,462 \times 92,327 - 79,046 \times 320,649) / 698,82 = 1,9735253$$

$$k = 7,196$$

$$y = 7196t^{0,5688}$$

計算公式：y=kt^a y_m:觀測值(mm) y_c:計算值(mm) t:時間(分) n:觀測次數 T=log t Y=log y_m

表二甲 (第二頁)

n	t	t ^{1/2}	t ^{3/2}	t ²	y _m	y _t	yt ^{1/2}	y _c
1	2	1.414	2.828	4	14.7	29.4	20.786	9.9
2	4	2.000	8.000	16	17.5	70.0	35.000	13.8
3	5	2.236	11.180	25	18.6	93.0	41.590	15.9
4	7	2.646	18.522	49	21.1	147.7	55.831	19.1
5	9	3.000	27.000	81	22.9	206.1	68.700	22.2
6	12	3.464	41.568	144	26.2	314.4	90.757	26.4
7	15	3.873	58.095	225	29.6	444.0	114.641	30.3
8	18	4.243	76.374	324	33.4	601.2	114.716	34.0
9	20	4.472	89.440	400	34.5	690.0	154.284	36.4
10	23	4.796	110.308	529	38.3	880.9	183.687	39.8
11	26	5.099	132.574	676	41.7	1,084.2	212.628	42.5
12	30	5.477	164.310	900	46.6	1,398.0	255.228	47.3
13	36	6.000	216.000	1,296	52.6	1,893.6	315.600	53.3
14	40	6.325	253.550	1,600	56.3	2,252.0	356.098	57.3
15	45	6.708	301.860	2,025	61.3	2,758.5	411.200	62.0
16	50	7.071	353.550	2,500	65.7	3,285.0	464.565	66.7
17	55	7.416	407.880	3,025	71.0	3,905.0	526.536	71.2
18	60	7.746	464.760	3,600	75.3	4,518.0	583.274	75.6
19	71	8.426	598.246	5,041	84.9	6,027.9	715.367	85.1
20	80	8.944	715.520	6,400	92.7	7,416.0	829.109	92.7
21	91	9.539	868.049	8,281	102.0	9,282.0	972.978	101.7
22	100	10.000	1,000.000	10,000	109.0	10,900.0	1,090.000	108.9
23	110	10.488	1,153.680	12,100	117.0	12,870.0	1,227.096	116.9
24	120	10.954	1,314.480	14,400	124.6	14,952.0	1,364.868	124.5
合 計	1,029	142.337	8,387.224	73,641	1,357.5	86,018.9	10,231.539	1,353.5

$$D = 1,029 \times 73,641 - (8,387.224)^2 = 5,431,063$$

$$S = (73,641 \times 10,231.539 - 86,018.9 \times 8,387.224) / 5,431,063 = 5.892$$

$$A = (86,018.9 \times 1,029 - 10,231.539 \times 8,387.224) / 5,431,063 = 0.497$$

$$y = 5.89t^{1/2} + 0.50t$$

計算公式：y = St^{1/2} + At y_m: 觀測值(mm) y_c: 計算值(mm) t: 時間(分) n: 觀測次數

表二乙 蔗田滲水深度與浸水時間關係式計算之二 嘉義公館農場47行尾端

n	t	T	y _m	Y	T ²	TY	y _c
1	2	0.693	18.3	2.907	0.480	2.015	15.20
2	4	1.386	22.5	3.114	1.921	4.316	21.60
3	5	1.609	24.6	3.203	2.589	5.152	24.20
4	7	1.946	28.7	3.357	3.787	6.532	28.69
5	9	2.197	31.1	3.437	4.827	7.551	32.58
6	12	2.485	34.8	3.550	6.175	8.822	37.70
7	15	2.708	39.8	3.684	7.333	9.976	42.22
8	18	2.890	43.7	3.777	8.352	10.916	46.30
9	20	2.996	46.3	3.835	8.976	11.490	48.85
10	24	3.178	51.0	3.932	10.100	12.496	53.57
11	27	3.296	54.0	3.989	10.864	13.148	56.86
12	30	3.401	57.0	4.043	11.567	13.750	59.99
13	35	3.555	61.4	4.117	12.638	14.636	64.88
14	40	3.589	66.4	4.196	13.609	15.470	69.42
15	45	3.807	71.1	4.264	14.493	16.233	73.68
16	50	3.912	75.8	4.328	15.304	16.931	77.75
17	55	4.007	80.5	4.388	16.056	17.583	81.55
18	60	4.094	84.7	4.439	16.761	18.173	85.26
19	70	4.249	93.5	4.538	18.054	19.282	92.19
20	80	4.382	101.9	4.624	19.202	20.262	98.66
21	90	4.500	110.7	4.707	20.250	21.182	104.70
22	100	4.605	118.2	4.772	21.206	21.975	110.48
23	110	4.701	126.8	4.843	22.099	22.767	115.89
24	120	4.787	134.6	4.902	22.915	23.466	121.14
合 計	1,028	79.073	1,577.4	96.946	289.558	334.124	

$$D_1 = 24 \times 289.558 - (79.073)^2 = 696.853$$

$$a = (334.124 \times 24 - 79.073 \times 96.946) / 696.853 = 0.5068$$

$$\log k = (289.558 - 96.946 - 79.073 \times 334.124) / 696.853 = 2.369922$$

$$k = 10.697$$

$$y = 10.697t^{0.507}$$

計算公式：y=kt^a y_m:觀測值(mm) y_c:計算值(mm) t:時間(分) n:觀測次數 T=logt Y=logy_m

表二乙 (第二頁)

n	t	t ^{1/2}	t ^{3/2}	t ²	y _m	y _t	yt ^{1/2}	y _c
1	2	1.414	2,828	4	18.3	36.6	25,876	13.3
2	4	2.000	8,000	16	22.5	90.0	45,000	19.1
3	5	2.236	11,180	25	24.6	123.0	55,006	21.5
4	7	2.646	18,522	49	28.7	200.9	75,940	25.8
5	9	3.000	27,000	81	31.1	279.9	93,300	29.5
6	12	3.464	41,568	144	34.8	417.6	120,547	34.6
7	15	3.873	58,095	225	39.8	597.0	154,145	39.1
8	18	4.243	76,374	324	43.7	786.6	185,419	43.3
9	20	4.472	89,440	400	46.8	936.0	207,054	45.9
10	24	4.899	117,576	576	51.0	1,224.0	249,849	50.8
11	27	5.196	140,292	729	54.0	1,458.0	280,584	54.4
12	30	5.477	164,310	900	57.0	1,710.0	312,189	57.7
13	35	5.916	207,060	1,225	61.4	2,149.0	363,242	63.0
14	40	6.325	253,000	1,600	66.4	2,656.0	419,980	68.1
15	45	6.708	301,860	2,025	71.1	3,199.5	479,939	73.0
16	50	7.071	353,550	2,500	75.8	3,790.0	535,982	77.6
17	55	7.416	407,880	3,025	80.5	4,427.5	596,988	82.1
18	60	7.746	464,760	3,600	84.7	5,082.0	656,086	86.5
19	70	8.367	585,690	4,900	93.5	6,545.0	782,315	94.9
20	80	8,944	715,520	6,400	101.9	8,152.0	911,394	102.9
21	90	9,487	853,830	8,100	110.7	9,963.0	1,050,211	110.6
22	100	10,000	1,000,000	10,000	118.2	11,820.0	1,182,000	118.0
23	110	10,488	1,153,680	12,100	126.8	13,948.0	1,329,878	125.2
24	120	10,954	1,314,480	14,400	134.6	16,152.0	1,474,408	132.2
合 計	1,028	142,342	8,366,495	73,348	1,577.4	95,743.6	11,584,332	1,569.1

$$D = 1,028 \times 73,348 - (8,366,495)^2 = 5,403,495$$

$$S = (73,348 \times 11,584,332 - 8,366,495 \times 95,743.6) / 5,403,495 = 9.000$$

$$A = (1,028 \times 95,743.6 - 8,366,495 \times 11,584,332) / 5,403,495 = 0.278$$

$$y = 9.00t^{1/2} + 0.28t$$

計算公式: $y = st^{1/2} + At$ y_m : 觀測值(mm) y_c : 計算值(mm) t : 時間(分) n : 觀測次數

(表三甲) 滲水深度方程式中誤差計算之一

		解 析 方 程 式 $y=5.89t^{1/2}+0.50t$			經 驗 公 式 $y=7.196t^{0.569}$		
t	y_m	y_c	Δy	$(\Delta y)^2$	y_c	Δy	$(\Delta y)^2$
(min)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm) ²	(mm)	(mm)	(mm) ²
2	14.7	9.9	+ 4.8	23.04	10.67	+ 4.03	16.24
4	17.5	13.8	+ 3.7	13.69	15.84	+ 1.66	2.76
5	18.6	15.9	+ 2.7	7.29	18.03	+ 0.57	0.33
7	21.1	19.1	+ 2.0	4.00	21.78	- 0.68	0.46
9	22.9	22.2	+ 0.7	0.49	25.11	- 2.21	4.88
12	26.2	26.4	- 0.2	0.04	29.58	- 3.38	11.42
15	29.6	30.3	- 0.7	0.49	33.59	- 3.99	15.92
18	33.4	34.0	- 0.6	0.36	37.25	- 3.85	14.82
20	34.5	36.4	- 1.9	3.61	40.12	- 5.62	31.58
23	38.3	39.8	- 1.5	2.25	42.86	- 4.56	20.79
26	41.7	42.5	- 0.8	0.64	45.95	- 4.25	18.06
30	46.6	47.3	- 0.7	0.49	49.83	- 3.23	10.43
36	52.6	53.3	- 0.7	0.49	55.27	- 2.67	7.13
40	56.3	57.3	- 1.0	1.00	58.70	- 2.40	5.76
45	61.3	62.0	- 0.7	0.49	62.76	- 1.46	2.13
50	65.7	66.7	- 1.0	1.00	66.66	- 0.96	0.92
55	71.0	71.2	- 0.2	0.04	70.33	+ 0.67	0.45
60	75.3	75.6	- 0.3	0.09	73.93	+ 1.37	1.88
71	84.9	85.1	- 0.2	0.04	81.34	+ 3.56	12.67
80	92.7	92.7	0	0	87.08	+ 5.62	31.58
91	102.0	101.7	+ 0.3	0.09	93.71	+ 8.29	68.72
100	109.0	108.9	+ 0.1	0.01	98.87	+ 10.13	102.62
110	117.0	116.9	+ 0.1	0.01	104.34	+ 12.66	160.28
120	124.6	124.5	+ 0.1	0.01	109.66	+ 14.94	223.20
合 計				59.66			765.03

$$M = \pm \sqrt{\frac{59.66}{24}} = 1.58 \text{ mm}$$

$$M = \pm \sqrt{\frac{765.03}{24}} = 5.64 \text{ mm}$$

y_m : 田間實測滲水深度 y_c : 計算滲水深度 Δy : 滲水深度差值 $\Delta y = y_m - y_c$ M : 中誤差 $M = \pm \sqrt{\frac{\sum \Delta y^2}{n}}$

n : 觀測次數 $n=24$

(表三乙) 滲水深度方程式中誤差計算之二

t	解 析 方 程 式 $y=9.00t^{1/2}+0.28t$				經 驗 公 式 $y=10.697t^{0.507}$		
	y_m	y_c	Δy	$(\Delta y)^2$	y_c	Δy	$(\Delta y)^2$
(min)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm ²)	(mm)	(mm)	(mm ²)
2	18.3	13.3	+ 5.0	25.00	15.20	+ 3.10	9.61
4	22.5	19.1	+ 3.4	11.56	21.60	+ 0.90	0.81
5	24.6	21.5	+ 3.1	9.61	24.20	+ 0.40	0.16
7	28.7	25.8	+ 2.9	8.41	28.69	+ 0.01	0.00
9	31.1	29.5	+ 1.6	2.56	32.58	- 1.48	2.19
12	34.8	34.6	+ 0.2	0.04	37.70	- 2.90	8.41
15	39.8	39.1	+ 0.7	0.49	42.22	- 2.42	5.86
18	43.7	43.3	+ 0.4	0.16	46.30	- 2.60	6.76
20	46.3	45.9	+ 0.4	0.16	48.85	- 2.55	6.50
24	51.0	50.8	+ 0.2	0.04	53.57	- 2.57	6.61
27	54.0	54.4	- 0.4	0.16	56.86	- 2.86	8.18
30	57.0	57.7	- 0.7	0.49	59.99	- 2.99	8.94
35	61.4	63.0	- 1.6	2.56	64.88	- 3.48	12.11
40	66.4	68.1	- 1.7	2.89	69.42	- 3.02	9.12
45	71.1	73.0	- 1.9	3.61	73.68	- 2.58	6.66
50	75.8	77.6	- 1.8	3.24	77.75	- 1.95	3.80
55	80.5	82.1	- 1.6	2.56	81.55	- 1.05	1.10
60	84.7	86.5	- 1.8	3.24	85.26	- 0.56	0.31
70	93.5	94.9	- 1.4	1.96	92.19	+ 1.31	1.72
80	101.9	102.9	- 1.0	1.00	98.66	+ 3.24	10.50
90	110.7	110.6	+ 0.1	0.01	104.70	+ 6.00	36.00
100	118.2	118.0	+ 0.2	0.04	110.48	+ 7.72	59.60
110	126.8	125.2	+ 1.6	2.56	115.89	+ 10.91	119.03
120	134.6	132.2	+ 1.4	1.96	121.14	+ 13.46	181.17
合 計				84.31			505.15

$$M = \pm \sqrt{\frac{84.31}{24}} = 1.88 \text{ mm}$$

$$M = \pm \sqrt{\frac{505.15}{24}} = 4.59 \text{ mm}$$

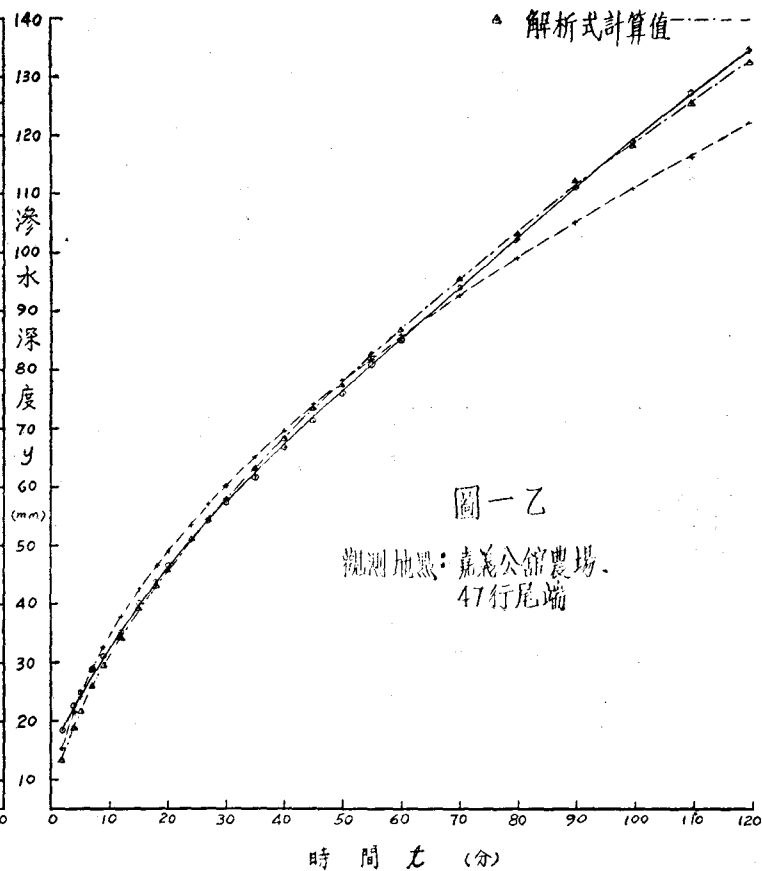
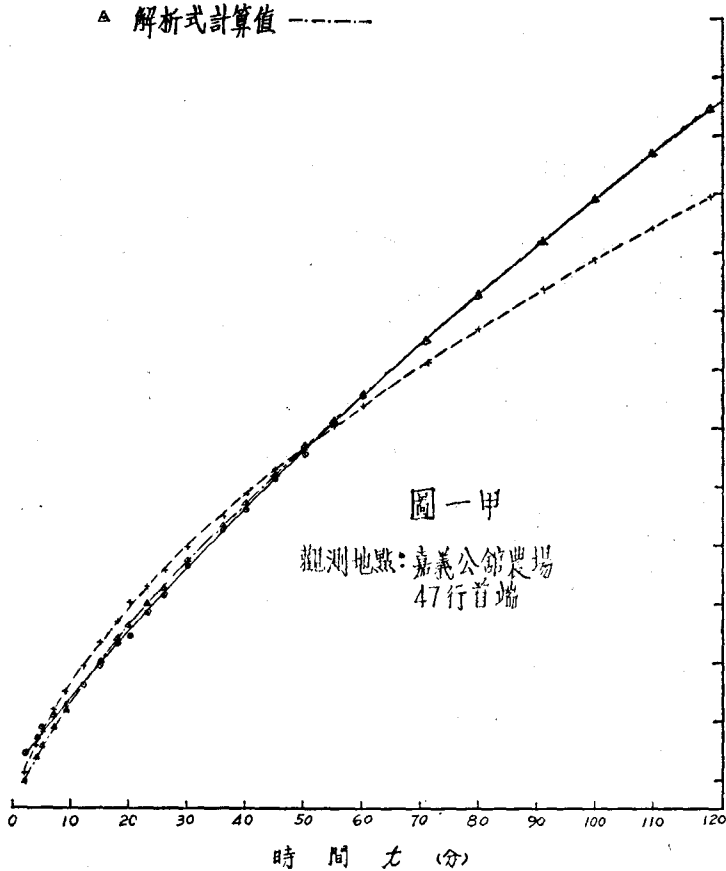
y_m : 田間實測滲水深度 y_c 計算滲水深度 Δy : 滲水深度差值 $\Delta y = y_m - y_c$ M : 中誤差 $M = \pm \sqrt{\frac{\sum \Delta y^2}{n}}$

n : 觀測次數 $n=24$

滲水深度計算值與觀測值

- 田間觀測值 ———
- + 經驗式計算值 - - - -
- △ 解析式計算值 - - - -

- 田間觀測值 ———
- + 經驗式計算值 - - - -
- △ 解析式計算值 - - - -



Philip 原試驗係在實驗室舉行。根據其計算如在(8)式中採用四項，當 t 為60小時， y 之誤差小於 $10^{-3(6)}$ 。一般田畦之灌溉時間，雖極少大於二小時，但(9)式僅採二項。為比較計，以三項式求滲水深度 y 之迴歸方程式。四項式之計算過於繁複耗時，暫從略。三項之方程式如下：

$$y = St^{1/2} + At + Bt^{3/2} \quad (21)$$

觀測記錄甲之三項式為：

$$y = 7.07t^{1/2} + 0.145t + 0.02365t^{3/2} \quad (22)$$

其中誤差經計算為 1.40mm，與二項式(19_b)之中誤差 1.58mm 僅差 0.18mm。據此，(9)式精確度已敷計算灌溉滲水深度需用。平均(19_b)及(20_b)得滲水深度與浸水時間之關係式如下：

$$y = 7.454t^{1/2} + 0.387t \quad (23)$$

三、灌溉用水量與灌溉供水效率

灌溉水流前進時，由於一部份水量滲入田畦，故其情況既非定量(steady)，亦非等速(uniform)。水力分析頗為複雜。國外學者如 Lewis, Milne, Criddle, Hall, Davis, Shull 等，均以水收支平衡法(Water balance method)推算水之前進速度及入滲量。其處理雖各異，但有二點類似。其一為對溝渠或田面之粗糙性及不均勻性，須先作假設，其二為水量之計算均假定水流至畦尾即切斷水源。關於第一點，Davis 及 Hall 採用 puddle factor $e^{(3)(4)}$ ，但此 e 值之採用標準全憑經驗，無一定之衡量尺度。關於第二點，在埂間灌溉(border irrigation)時，與實際田間差異或尚小，但在溝灌(furrow irrigation)時，水流至溝尾後，必繼續供水，否則滲水將極不均勻。蔗田之灌溉以溝灌居多，在灌溉實務上甚難符合此項假定。由(9)式得知，田畦滲水深度隨浸水時間而正變，則蔗田滲水深度可藉浸水時間求得。畦溝各點之浸水時間，則藉實測灌溉水流前進速度析算，再由量測之土壤最大容水量(maximum water holding capacity)及施灌前土壤含水量計算灌溉用水量及供水效率。

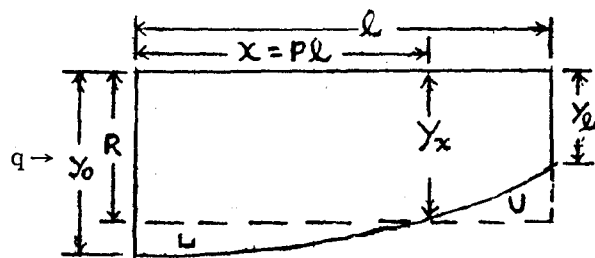


圖 A

圖A所示為灌溉水流自左向右時，滲水量分布情形。

如圖令： l = 畦溝長度(m)

x = 足量灌溉點至畦首距離(m)

$$p = \frac{x}{l}, x = pl$$

T_e = 灌溉水流達畦尾時間(分)

T_x = 灌溉水流達距畦首 x 公尺時間(分)

t_0 = 灌溉時間(分)

t = 任意點浸水時間(分)

$$m = \frac{t_0}{T_e}, t_0 = mT_e$$

R = 所需灌溉水深(mm)

y_0 = 畦首滲水深度(mm)

y_x = 距畦首 x 公尺處滲水深度(mm)

y_e = 畦尾滲水深度(mm)

Y_e = 1公尺內單位寬度總滲水量(m^3/m)

Y_{p_x} = x 公尺內單位寬度總滲水量(m^3/m)

L = 單位寬度田間損失水量(m^3/m)

U = 單位寬度田間不足水量(m^3/m)

q = 畦溝流入量(liter/sec)

α, n , 係數

由式(9)，若距畦首 x 公尺處之滲水深度 y_x 適為所需灌溉水深 R ，則

$$R = St^{1/2} + At \quad (9a)$$

解式(9a)，得

$$t = \frac{S^2}{2A^2} \left[1 + \frac{2AR}{S^2} - \sqrt{1 + \frac{4AR}{S^2}} \right] \quad (24)$$

由令設 $t_0 = mT_e$

$$t = t_0 - T_x = mT_e - T_x \quad (25)$$

根據不同流量實測之灌溉水流前進曲線， T_x 與 x 之關係，可書如下式

$$T_x = \alpha x^n \quad (26)$$

$$\text{同理 } T_e = \alpha l^n \quad (27)$$

$$\text{聯立(26)，(27)得 } \frac{T_x}{T_e} = \left(\frac{x}{l} \right)^n = p^n \quad (28)$$

$$\text{以(28)代入(25)得 } t = mT_e \left(1 - \frac{1}{m} p^n \right) \quad (29)$$

以二項定理解 $(1 - \frac{1}{m} p^n)^{1/2}$

$$\left(1 - \frac{1}{m} p^n \right)^{1/2} = 1 - \frac{1}{2m} p^n - \frac{1}{8m^2} p^{2n} \quad (30)$$

p 值小於 1 時，若 $m < 2.5$ ， $\frac{1}{8m^2} p^{2n} < 0.02$ ，故式

$$(30) \text{ 可略作：} (1 - \frac{1}{m} p^n)^{1/2} = 1 - \frac{1}{2m} p^n \quad (31)$$

由(31)及式(9)得：

$$y_0 = S\sqrt{mT_x} + AmT_x \quad (32a)$$

$$y_x = S\sqrt{mT_x} (1 - \frac{1}{2m}) + Am (1 - \frac{1}{m}) T_x \quad (32b)$$

$$y_{p_x} = y_x = S\sqrt{mT_x} (1 - \frac{1}{2m} p^n) + AmT_x (1 - \frac{1}{m} p^n) \quad (32c)$$

$$Y_{p_x} = \int_0^{p_x} y_{p_x} dx = p\ell [S\sqrt{mT_x} (1 - \frac{1}{2m} \frac{p^n}{n+1}) + AmT_x (1 - \frac{1}{m} \frac{p^n}{n+1})] \quad (33)$$

$$Y_x = \ell [S\sqrt{mT_x} (1 - \frac{1}{2m} \frac{1}{n+1}) + AmT_x (1 - \frac{1}{m} \frac{1}{n+1})] \quad (34)$$

$$L = Y_{p_x} - p\ell y_{p_x} = \frac{\ell}{m} (\frac{1}{2} S\sqrt{mT_x} + AmT_x) \frac{n}{n+1} p^{n+1} \quad (35)$$

$$U = y_{p_x} (1-p) \ell - (Y_x - Y_{p_x}) = \frac{\ell}{m} (\frac{1}{2} S\sqrt{mT_x} + AmT_x) (\frac{1}{n+1} - p^n + \frac{n}{n+1} p^{n+1}) \quad (36)$$

由式(25)

$$m = \frac{1}{T_x} (t + T_x) = \frac{t}{T_x} + 0^n \quad (37)$$

p 之含義為足量灌溉點至畦首距離 x 與灌溉溝長 l 之比數，必為正值。由式(35)得知，當 $p > 0$ 時， $L > 0$ ，此說明任何灌溉情形下，必有滲漏損失。由式(35)及(36)得知，當 $p = 1$ 時， $U = 0$ ，而 L 為最大。亦即蔗田全面足量灌溉時，田間滲漏損失為最大。故若 p 值增大，滲漏損失 L 亦加大，但田間不足水量 u 減低；若 p 值減小則反是。當 $p^n = \frac{1}{n+1}$ 時， $L = U$ 。滲耗水量與田間不足水量相等，亦即平均滲水深度 y_{av} 與所需灌溉水深 R 相等。

n 之值通常介 1~2 間，則 $p^n = \frac{1}{n+1}$ 時， p^n 之值介 $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$ 間，p 值介 0.500~0.576 之間。故知若

$p^n = \frac{1}{n+1}$ ，則僅有約一半左右田畝灌溉足量；且若

$p^n < \frac{1}{n+1}$ ，平均滲水量已小於所需灌溉水深，當不足取。故 p 之下限不宜小於 $(\frac{1}{n+1})^{1/n}$ 。在 $p = 1$ 時，

田畦已全面足量灌溉，若 $p > 1$ ，則增灌水量均成滲漏損失，故 p 之上限應為 1。

全面足量灌溉既有最大之滲漏耗損，則欲使滲耗減少必須有部份田面之灌溉水深低於足量。最經濟之灌溉用水量，須比較不足量使甘蔗減產之折價與滲耗水量所需費用多寡而定。當減低不足水量之生產增值，與增加滲漏損失之損耗費用相等時，此時之灌溉用水量乃為最經濟者。

每單位滲漏損耗水量之費用即為水費 C_1 ，但單位水量之生產增值，須視當時蔗田不足水量 U 而異，為 U 之函數，可書作 $f(U)$ 。故經濟灌溉用水之條件為：

$$C_1 \frac{dL}{dp} = -f(u) \frac{dU}{dp} \quad (38)$$

$$\text{自(35)及(36)} \quad \frac{dL}{dp} = -\frac{\ell}{m} [-\frac{1}{2} S\sqrt{mT_x} + AmT_x] np^n \quad (39)$$

$$\frac{dU}{dp} = -\frac{\ell}{m} [-\frac{1}{2} S\sqrt{mT_x} + AmT_x] np^n (1 - \frac{1}{p}) \quad (40)$$

聯立(38)，(39)，(40)三式得：

$$C_1 = -f(U) (1 - \frac{1}{p}) \quad (41)$$

$$p = \frac{f(U)}{C_1 + f(U)} \quad (42)$$

f(U) 之型式需根據缺水量與甘蔗產量之關係求得。若單位水量使蔗產之增值為一定值，即 $f(U) = C_2$ ，則

$$p = \frac{C_2}{C_1 + C_2} \quad (42a)$$

當 C_2 較遠 C_1 為大時， $C_2 \gg C_1$ ， $p = 1$ 。

在 p 值關係式(42)及(42a)中， C_1 之值較易獲致，f(U) 或 C_2 之值需藉長期觀察試驗。Hall 意見⁽⁵⁾在 $p = 0.95$ 時，田畦始為足量灌溉。但 p 值之決定，直覺性較大，並可視耕地地力而增減。Hansen 就平均各類作物灌溉之經驗，認為若 $p > 0.75$ ，灌溉已不經濟⁽⁶⁾。惟中美經濟情況不同，臺灣蔗田灌溉應採用何 p 值，當隨土壤物理之不同及作物缺水之反應而異。而待進一步實驗研究。

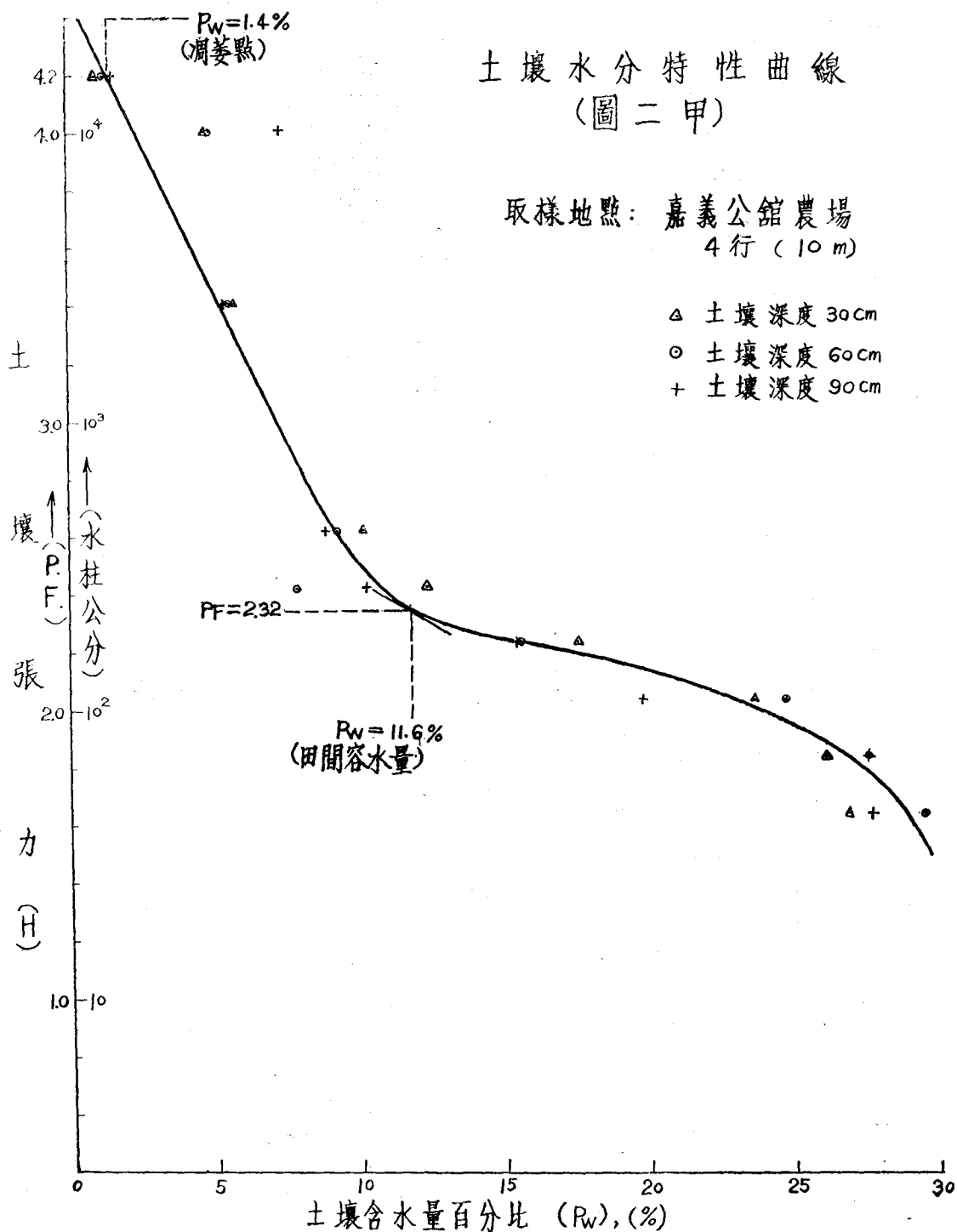
由於 p 值與灌溉用水量成正比，故 p 值為決定灌溉用水量之一因子。由式(34)所示，單位寬度灌溉用

水量 Y_2 可由 S, A, l, T_2, n 及 m 求得。 S 及 A 係土壤滲水係數，與 l, T_2 及 n 均可在田間實測計算； m 可藉式(37)由 p 值算出。灌溉用水量 Y_2 決定後，灌溉供水效率 E_a 可由下式求出。

$$E_a = \frac{Y_2 - L}{Y_2} = 1 - \frac{L}{Y_2} \quad (43)$$

四、灌溉用水量觀測計算實例

根據以上分析步驟，以嘉義公館農場蔗田為例，



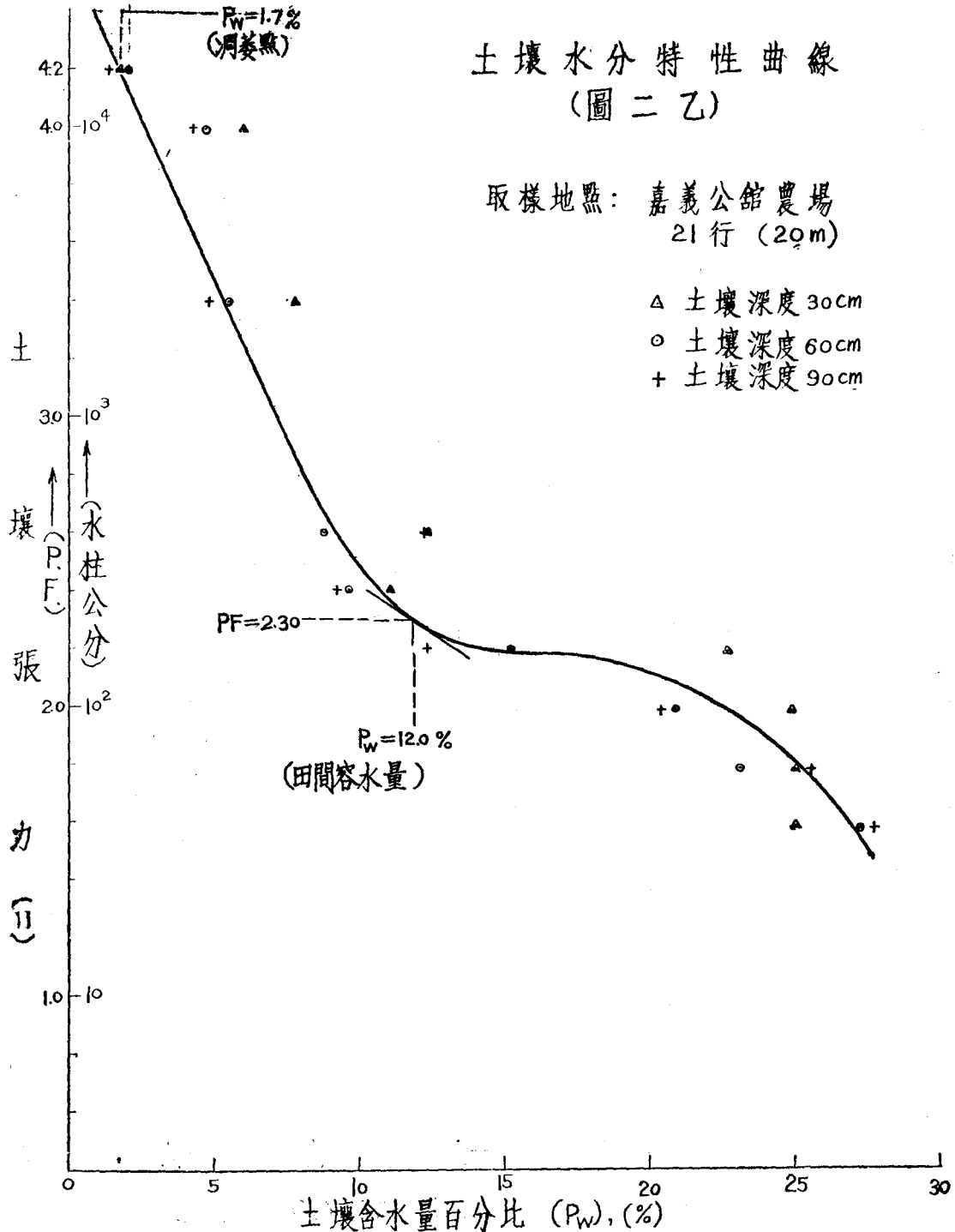
測定有關土壤物理性質，並觀測不同流量灌溉水流前進情形，推算灌溉用水量。

，90cm 三種土深，採樣四處，以烘乾法測定。平均值 $A_s=1.56\text{gm/c.c.}$

一、土壤物理性測定

1. 土壤容重 (bulk density)：在 30cm，60cm

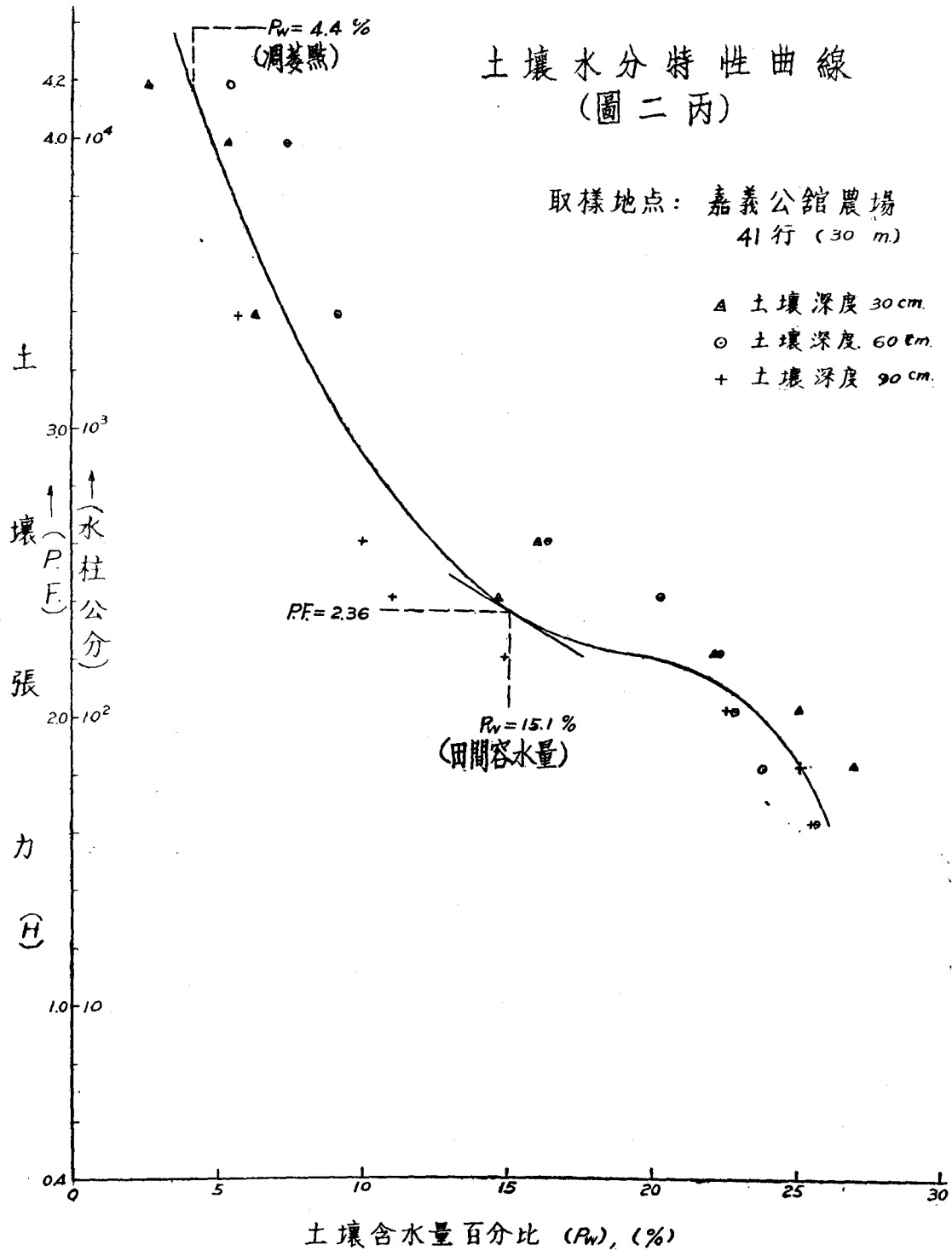
2. 土壤質地(texture)：在30cm，60cm，90cm 三種土深，採樣三處，以機械分析及比重計分析測定。平均值為：砂粒 70.8%，粉粒 21.0%，粘粒 8.2%



，屬砂壤土 (sandy loam)。

3. 土壤水分特性曲線 (Soil moisture release curve)：在 30cm, 60cm, 90cm, 三種土深，採樣三處，以壓力儀 (pressure membrane) 測定不同

張力下之土壤含水量，繪製曲線如圖二甲，乙，丙。由圖求出土壤田間容水量 (effective water holding capacity) 及凋萎點 (wilting point) 之含水量，並求其平均值。



田間含水量：

$$F.C. = \frac{1}{3}(15.1 + 12.0 + 11.6)\% = 12.9\%$$

凋萎點：

$$W.C. = \frac{1}{3}(4.4 + 1.7 + 1.4)\% = 2.5\%$$

4. 灌溉前土壤含水量：在 30cm, 60cm, 90cm 三種土深，採樣四處，以烘乾法測定。平均值為 7.7%。根據土壤最大含水量及凋萎點之含水量，計算灌溉前所合有效水量 (available moisture) 百分比為 50%。其記錄與計算見表四。

二、灌溉水流前進曲線

試驗前整平畦溝，定縱坡為 0.4%，試驗溝長 50 公尺。自距畦首 5 公尺起，每隔 5 公尺設置標樁，俾量測水流到達時間。畦首用巴歇爾水槽控制流量，以 1 li/sec 2 li/sec 3 li/sec 及 4 li/sec 四種不同流量引入畦溝，每種流量觀測四重複，記錄水流前進時間及到達距離。觀測記錄見表五。取流距與到達時間之相對值，以最小誤差法計算各流量之流距與到達時間之關係，並以雙對數圖解法核對，繪製灌溉水

表四：嘉義公館農場灌溉前含水量測定記錄

採樣地點	採樣深度	含水量	"	"	含水量	"	"	含水量	"	"	平均含水量
(行)	(cm)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	%
32	30	6.7	8.3	8.3	8.0	8.6	6.5	6.4	6.8	7.2	7.72
32	60	9.3	6.9	6.9	9.1	6.8	7.4	7.0	7.8	7.3	7.41
32	90	5.1	9.8	7.0	6.4	12.0	8.4	5.5	8.9	8.2	7.92
											7.65
14	30	6.8	6.2	5.1	11.1	9.3	2.5	7.1	9.1	5.1	6.92
14	60	11.0	9.6	5.8	11.3	6.8	4.3	9.8	9.8	4.1	8.39
14	90	12.1	9.3	4.6	8.0	8.8	4.2	7.6	10.3	3.9	7.65
										3.9	7.65
24	30	5.0	7.2	4.8	2.1	8.6	8.4	6.6	6.9	4.6	6.02
24	60	8.3	7.4	9.9	7.7	7.6	8.4	8.1	8.1	7.4	8.10
24	90	5.3	5.4	7.8	5.8	6.8	3.9	4.9	6.4	5.1	5.71
											6.61
6	30	7.0	8.2	8.6	9.7	10.0	8.8	7.4	6.7	8.4	8.31
6	60	12.0	9.8	9.8	12.5	7.3	7.8	10.5	9.7	9.3	9.85
6	90	8.6	9.6	7.7	7.6	8.5	6.6	9.5	10.3	6.9	8.36
											8.84

$$\text{灌溉前含水量平均值：} P_w = \frac{1}{4}(7.65 + 7.65 + 6.61 + 8.84) = 7.68 \approx 7.7\%$$

$$\text{灌溉前有效水分百分比：} AM = \frac{P_w - W.C.}{F.C. - W.C.} = \frac{7.7 - 2.5}{12.9 - 2.5} = 0.50$$

表五：灌溉水流前進時間與到達距離實測記錄 嘉義公館農場 (沙壤土)

水流距離 l (m)	流 量 $q=4$ l/sec												
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	
水流到達時間 (分)	0	0.4	0.8	1.2	1.7	2.4	3.2	4.2	5.2			7.0	
" " "	0	0.3	0.8	1.3	1.9	2.5	3.0	3.8	4.7			6.0	
" " "	0	0.3	0.8	1.3	1.8	2.5	3.1	3.8	4.5	5.3		5.8	
" " "	0	0.3	0.8	1.5	2.1	2.7	3.4	4.1	5.2	6.5		7.4	
平均水流時間 T_p (分)	0	0.33	0.8	1.33	1.88	2.53	3.18	3.98	7.90	5.9		6.55	

流 量 $q=3 \ell/sec$												
水 流 距 離 ℓ (m)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60
水 流 到 達 時 間 (分)	0		0.6	1.0	1.4	2.4	3.1	4.3	5.5	7.3	8.3	
" " "	0	0.2	0.5	1.2	1.8	2.6	3.3	4.1	4.9	5.8	6.7	
" " "	0	0.4	0.8	1.2	1.8	2.3	3.2	3.9	4.7	6.2	7.1	
" " "	0	0.3	0.8	1.3	2.1	2.9	3.5	4.2	5.3	6.6	7.8	
平 均 水 流 時 間 T_0 (分)	0	0.3	0.68	1.18	1.78	2.55	3.28	4.13	5.1	6.48	7.48	

流 量 $q=2 \ell/sec$												
水 流 距 離 ℓ (m)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60
水 流 到 達 時 間 (分)	0	0.6	1.5	2.8	4.0	5.3	6.7	8.3	10.0	11.6	13.2	
" " "	0	0.3	0.8	1.7	2.6	3.5	5.4	7.4	9.0	12.0	14.8	
" " "	0	0.5	1.1	2.1	3.1	4.0	4.7	6.6	8.1	9.7	11.9	
" " "	0	0.4	1.5	2.5	3.6	4.8	6.0	7.8	9.5	10.2	12.5	
平 均 水 流 時 間 T_2 (分)	0	0.45	1.23	2.28	3.32	4.4	5.7	7.53	9.15	10.9	13.1	

流 量 $q=1 \ell/sec$												
水 流 距 離 ℓ (m)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60
水 流 到 達 時 間 (分)	0		0.7		3.2		9.9		21.5		37.2	66.7
" " "	0		1.8		4.8		9.0		35.2		43.5	107.5
" " "	0		1.5		4.4		8.3		14.5		27.5	
" " "	0	0.5	1.6	2.5	5.6	8.1	12.2	17.6	25.4	33.0	42.2	
平 均 水 流 時 間 T_2 (分)	0	0.5	1.4	2.5	4.5	8.1	9.85	17.6	24.2	33.0	37.6	87.1

流前進曲線如圖三，四，五，六。

各流量流距與到達時間關係式如下：

$$q=4 \ell/s \quad T_2=0.039 \ell^{1.306} \quad (44_a)$$

$$q=3 \ell/s \quad T_2=0.027 \ell^{1.426} \quad (44_b)$$

$$q=2 \ell/s \quad T_2=0.044 \ell^{1.452} \quad (44_c)$$

$$q=1 \ell/s \quad T_2=0.015 \ell^{1.985} \quad (44_d)$$

三、灌溉用水量

1. 蔗田所需灌溉水深(R)：灌溉入滲水量如止於根區(root zone)，則可被作物利用，滲漏根區以下之水，全屬耗損。故根區深度可決定灌溉所需水深。甘蔗根區深達1公尺左右，惟在0~50公分土深內，

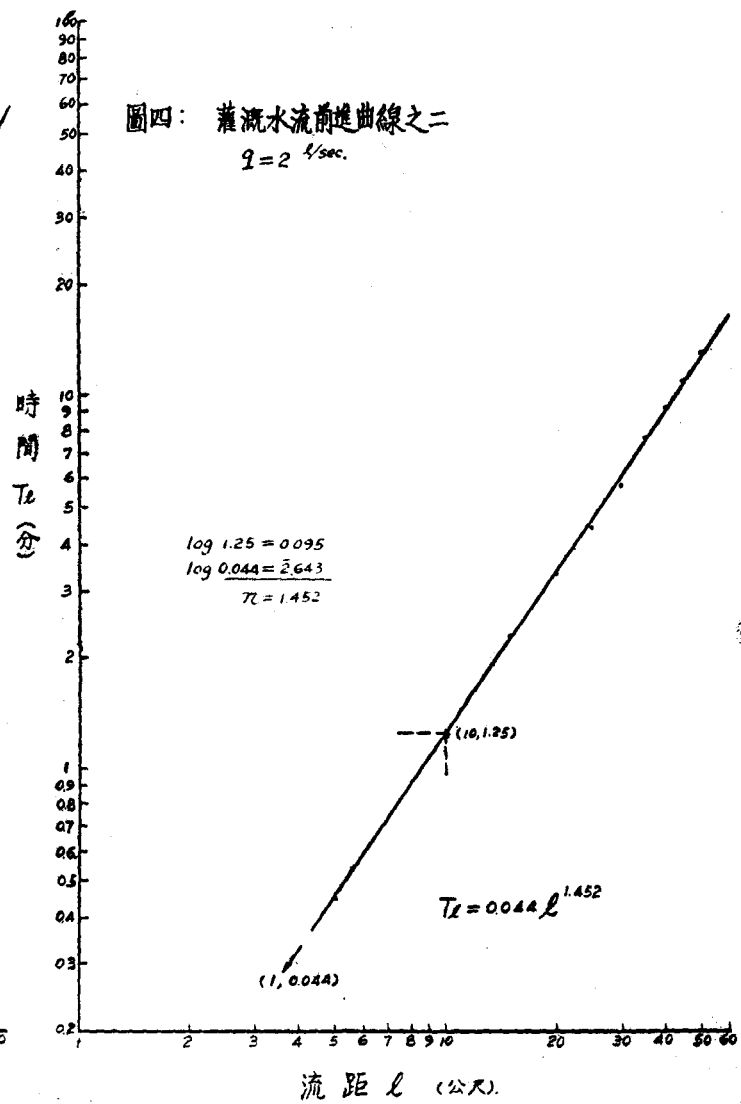
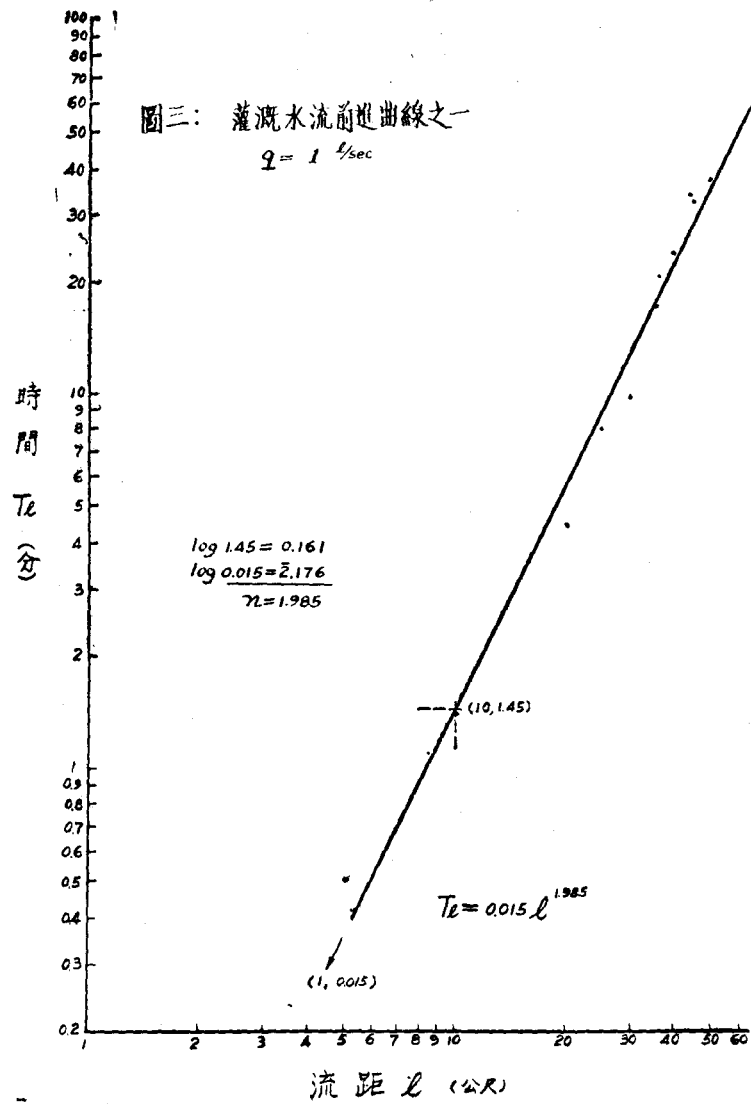
約有80%左右之根系⁽¹⁴⁾，設需灌土壤深度 $d=50cm$ ，則

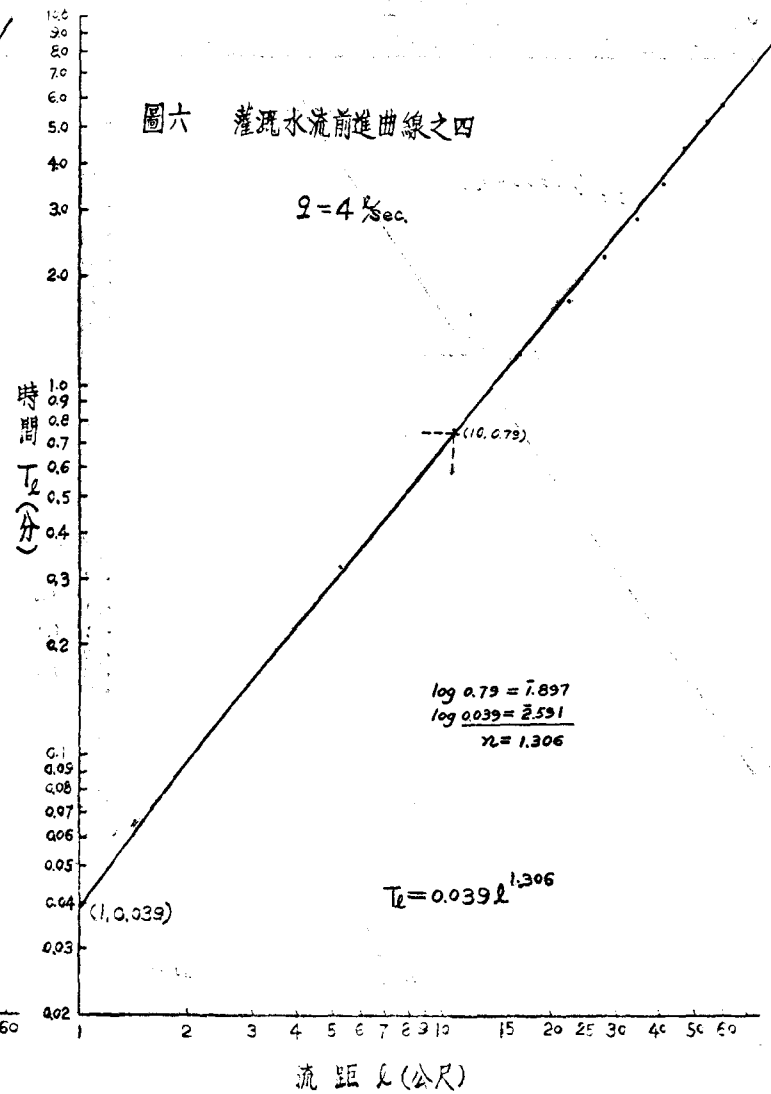
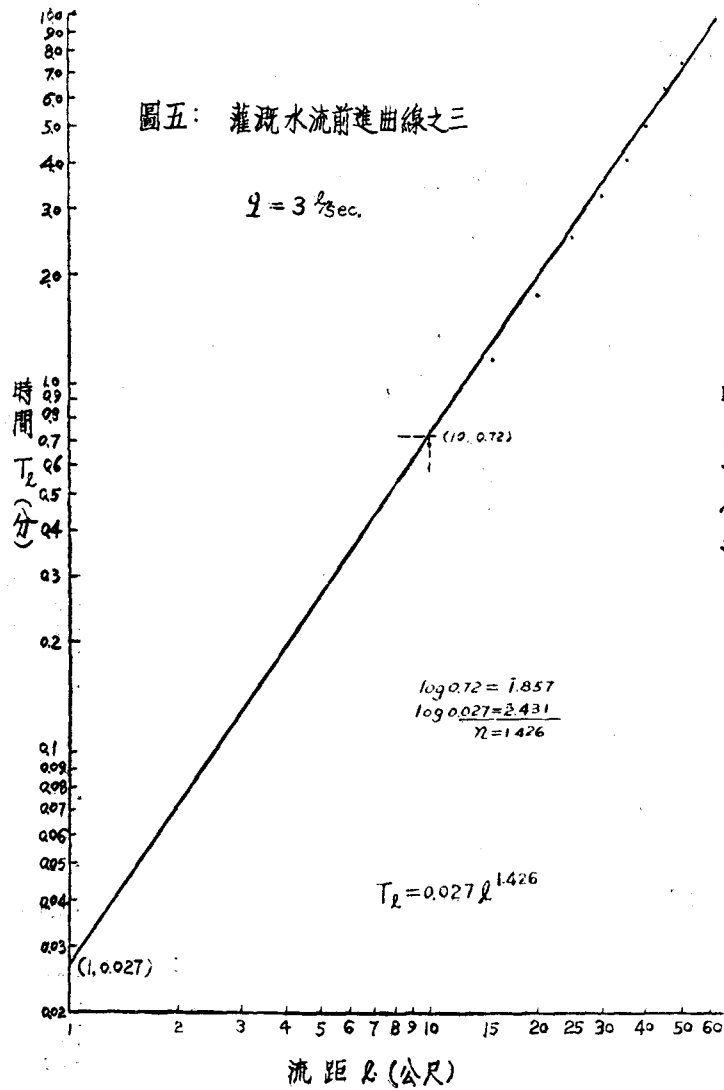
$$R=(F.C-P_w) d A_s=(12.9-7.7) \times 5.00 \times 1.56=40.6(mm)$$

式中 P_w 表灌溉前土壤含水量百分比

2. 灌溉水深為 R 時所需浸水時間(t)：由式 (24)

$$\begin{aligned} \text{得 } t &= \frac{S^2}{2A^2} \left[1 + \frac{2AR}{S^2} - \sqrt{1 + \frac{4AR}{S^2}} \right] \\ &= \frac{7.454^2}{2 \times 0.387^2} \left(1 + \frac{2 \times 0.387 \times 40.6}{7.454^2} \right. \\ &\quad \left. - 1 + \sqrt{\frac{4 \times 0.387 \times 40.6}{7.454^2}} \right) = 19.6(min) \end{aligned}$$





3. 灌溉用水量(Y_p)及供水效率(E_a):

由 R , t 及適宜之 p 值, 藉式(44), (37), (34), (35) 及 (43), 可計算不同流長 ℓ 之 T_p, m, t_o, Y_p, L , 及 E_a 各值。茲將公館農場蔗田, 在最小 p 值 $p = (\frac{1}{n+1})^{1/m}$ 及最大 p 值 ($p=1$) 時之灌溉用水量及供水效率等值列算如表六及表七。

由表所示數字, 得見在 $p=0.50 \sim 0.576$ 時, 各流量間之供水效率 E_a 差異均不顯著, 宜採用較小之畦溝流入量。溝長在30公尺以下可採用 1 ℓ/sec ; 溝長自30公尺至60公尺, 可採用 2 ℓ/sec 。在 $p=1$ 時, 僅流量 3 ℓ/sec 與 4 ℓ/sec 之 E_a 差異不顯著, 2 ℓ/sec 及 1 ℓ/sec 之 E_a , 均較 3 ℓ/sec 減低頗多, 宜採用 3 ℓ/sec 之流入量。

表六: 灌溉用水量及灌溉效率計算之一

$$P = \left(\frac{1}{n+1}\right)^{1/m}$$

q	n	ℓ	T_p	m	t_o	Y_p	L	E_a
(ℓ/sec)		(m)	(min)		(min)	(m^3/m)	(m^3/m)	(%)
4	1.303	60	8.16	2.840	23.16	2.436	0.077	98.1
4	1.303	50	6.43	3.485	22.40	2.030	0.050	98.8
4	1.303	40	4.81	4.514	21.70	1.624	0.028	99.3
4	1.303	30	3.31	6.369	21.06	1.218	0.017	99.6
4	1.303	20	1.95	10.501	20.48	0.812	0.008	99.8
3	1.422	60	9.08	2.572	23.35	2.436	0.084	97.9
3	1.422	50	7.01	3.211	22.52	2.030	0.056	98.6
3	1.422	40	5.10	4.256	21.72	1.624	0.032	99.2
3	1.422	30	3.39	6.198	21.00	1.218	0.017	99.6
3	1.422	20	1.90	10.710	20.35	0.812	0.005	99.9
2	1.447	60	16.35	1.609	26.32	2.436	0.151	96.3
2	1.447	50	12.56	1.971	24.75	2.030	0.100	97.5
2	1.447	40	9.09	2.566	23.34	1.624	0.058	98.6
2	1.447	30	6.00	3.680	22.08	1.218	0.028	99.3
2	1.447	20	3.33	6.290	20.95	0.812	0.010	99.8
1	1.976	40	21.82	1.235	26.95	1.624	0.117	97.1
1	1.976	30	12.36	1.923	23.80	1.218	0.051	98.7
1	1.976	20	5.55	3.872	21.46	0.812	0.014	99.7

貯水效率 $E_s = E_o$

$R = 40.6 \text{ mm}$

$S = 7.454 \text{ mm/min}^{1/2}$

$A = 0.387 \text{ mm/min}$

表七：灌溉用水量及灌溉效率計算之二

P=1

q	n	l	T _z	m	t ₀	Y _z	L	E _a
(l/sec)		(m)	(min)		(min)	(m ³ /m)	(m ³ /m)	(%)
4	1.303	60	8.16	3.406	27.81	2.800	0.303	39.2
4	1.303	50	6.43	4.051	26.04	2.273	0.203	91.1
4	1.303	40	4.81	5.080	34.43	1.767	0.124	93.0
4	1.303	30	3.31	6.935	22.94	1.292	0.065	95.0
4	1.303	20	1.95	11.067	21.59	0.842	0.027	96.8
3	1.422	60	9.08	3.159	728.67	2.847	0.346	87.9
3	1.422	50	7.01	3.798	26.62	2.301	0.228	90.1
3	1.422	40	5.10	4.843	24.69	1.781	0.137	92.3
3	1.422	30	3.39	6.785	22.99	1.297	0.700	94.6
3	1.422	20	1.90	11.297	21.46	0.842	0.027	96.8
2	1.447	60	16.35	2.200	35.98	3.173	0.584	81.6
2	1.447	50	12.56	2.562	32.18	2.509	0.388	84.5
2	1.447	40	9.09	3.157	28.70	1.904	0.233	87.8
2	1.447	30	6.00	4.271	25.63	1.358	0.120	91.2
2	1.447	20	3.33	6.881	22.90	0.863	0.046	94.7
1	1.976	40	21.82	1.899	41.45	2.321	0.560	75.8
1	1.976	30	12.36	2.587	32.00	1.526	0.258	83.1
1	1.976	20	5.55	4.536	25.16	0.906	0.098	89.2

貯水效率 E_s = 1

R = 40.6 mm

S = 7.454 mm/min^{1/2}

A = 0.387 mm/min

五、結 論

一、土壤滲水深度 y 為決定灌溉用水量之一重要因素。浸水時間 t 愈長，滲水愈深。美國農部及本省以往之灌溉試驗，均以經驗公式 $y = kt^a$ 公式尋求 y = t 之關係。本試驗初次試用理論解析公式 $y = st^{1/2} + At$ ，以蔗田實測 y，t 記錄與經驗式比較，發現滲水深度之田間觀測值與解析式之計算值甚為接近，與經驗公式計算值相差較大，尤以 t 值較大時為然。如在 50% 有效水分時施行灌溉，嘉義公館農場 0.4% 蔗田之 y-t 關係式為：

$$y = 7.454t^{1/2} + 0.387t$$

二、若足量灌溉點至畦首距離 x 與畦溝全長 l 之比值為 p，則 p 值愈大，滲漏耗損亦愈大，但蔗田根區不足水量愈少。最經濟之灌溉用水量，在使減少

根區不足水量之生產增值與增加滲漏耗損之費用相等之時。p 值之大小決定灌溉用水量之多寡，其擇定須根據甘蔗產量與用水量關係之研究試驗，其值應介於 0.50~0.576 至 1 之間。

三、在不影響作物生長情況下，灌溉用水量之選擇，應採用具有較高供水效率者。根據試驗研究及計算結果，可得推論如下：

1. 流量固定時，流距愈長，供水效率 E_a 愈低，流距愈短，供水效率愈高。

2. 流距固定時，流量愈大，供水效率愈高；流量愈小，供水效率愈低。

3. p 值小時，上項供水效率之差異甚微，(灌溉規劃時，可考慮採用長流距及較小流量。) p 值大時，供水效率之差異頗大。

4. 嘉義公館農場實測資料顯示：在畦溝縱坡為 0.4%，當 $p=0.50\sim 0.576$ ，各流量間 E_a 差異均不顯著。當 $p=1$ ，僅 3 ℓ/sec 與 c ℓ/sec 之 E_a 差異不顯著，2 ℓ/sec 及 1 ℓ/sec 之 E_a 均較 3 ℓ/sec 者減低頗多。

SUMMARY

The two criteria for good irrigation are adequacy and uniformity. Adequate application of water guarantees normal plant growth; while uniform application reduces deep percolation loss, thereby lowers the water cost. In surface irrigation, due to the fact that the time for infiltration is different from place to place, it is impossible to get an absolutely uniform application of water the entire field. This study is taking both adequacy and uniformity into account, to find out the most economical irrigation requirement.

Empirical infiltration-time relationships have been widely used by USDA and in Taiwan. A non-empirical infiltration equation is used in this experiment. It reveals that the deviations between the observed values and the calculated values from the non-empirical equation are less than those from the empirical formula. It is more so when the time t is comparatively large.

The most economical irrigation requirement will be the point when more water being added, the increase in yield value caused by the reduction of water deficit will equal to the cost for more water loss. If the percentage of adequate irrigation to the entire field is p , water loss will be bigger for a larger p , but water deficit will be smaller, and vice versa. The selection of p , should depend on the available water and cane-yield analysis, with a value between 0.50-0.576 and 1.

Under the condition that the water deficit will not hinder the plant growth, the irrigation requirement should be the one with higher water application efficiency. Inferences from the field data are as follows:

1. With constant inflow rate, the longer is the flow distance, the lower is the application efficiency; the shorter, the higher.
2. With constant flow distance, the bigger is the flow rate, the higher is the application efficiency; the smaller, the lower.
3. When p is small, the difference in application efficiencies due to different flow rates or flow distances is small and may be negligible; when p is large, the difference is appreciable.

For Kon-kuan Farm near Chiayi, a sugar cane field of sandy loam with furrow slope of 0.4%, it is suggested that an inflow rate of 1 or 2 liters per second may be used for small p , and 3 liters per second for large p . However, data are not yet sufficient for sloping sugar cane farms, and further study is undoubtedly necessary.

本研究得國家長期發展科學委員會之補助，並承葉政秀、吳純宏、邱明森、方永泰、張雅雄、黃東瑞、王會經諸君分別協助田間觀測，實驗室分析及計算工作，併此誌謝。

六、參 考 文 獻

1. Boundurant, J. A. 1957
Developing furrow infiltrometer Agri. Engg 38:602-604
2. Criddle at el 1956
Method for evaluating irrigation Systems Agr. Hdbk 82 SCS USDA

3. Davis, J. R. 1961
Estimating rate of advance for irrigation furrows Trans ASAE 4:42-54,57
4. Hall, W. A. 1956
Estimating Irrigation Border flow Agr. Eng'g 37:263-265
5. Hall, W. A. 1960
Performance Parameters of irrigation systems Trans. ASAE 3:75-76,81
6. Hansen, V. E. 1960
New concepts in irrigation efficiency Trans. ASAE 3:55-57, 61, 64
7. Lewis, M.R. and W. E. Milne 1938
Analysis of border order irrigation Agr Eng'g 19:267-272
8. Philip, J. R. 1957
The theory of infiltration, ppt. 1 Soil Science 83:345-357
9. Philip, J. R. 1958
The theory of infiltration, pt. 6 Soil Science 85:278-286
10. Philip, J. R. and D. A. Farrell 1946
General Solution of the infiltration advance problem in irrigation hydraulics
Jour. of Geophys. Research 69:621-631
11. Shull, Holms 1960
Furrow hydraulics study at the Southwestern irrigation field station
Droc. of the ARS-SCS Workshop on Surface Irrigation. Denver, Col., V.S.A. pp 55-62
12. Wimberly, J. E. 1964
Design of furrow irrigation System for Sugar cane Agr. Eng'g 45:138-139
13. 張建勛等 民國五十五年一月
嘉南學甲地區旱作灌溉研究試驗報告 國立臺灣大學農業工程系刊印
14. 劉明欽等 民國四十八年
甘蔗品系農藝特性之考察
臺糖公司臺中改良場 47/48 年研究簡報

益 昌 鐵 工 廠

等	(前	機	萬	抽	設	一
	ク	車	能	水	計	般
製	ッ	前	角	機	・	機
	シ	又	鋼	用	灌	械
造	ヨ				漑	
	ン)				用	

臺 南 市 成 功 路 4 巷 11 號

電 話 2 5 8 3 8