

暗管排水間距與深度之設計

Design of Depth and Spacing of Tile Drains

施 嘉 昌

臺大農工系教授

Abstract

Design depth and spacing of tile drains, we have to consider all of the factors which influence the effect of tile drainage such as soil permeability, specific yield, depth of root zone, irrigation period and times, deep percolation of irrigation water, climatic condition, irrigation water quality, ground water fluctuation etc.

Two methods represent in this paper for designing tile drains. The first method is Using in the Bureau of Reclamation to determine drain spacing in the United States, It takes into account the transient regimen of the ground water recharge and discharge. It is also designed to give a spacing which produces dynamic equilibrium condition at a specified water-table height under the specific soil, irrigation, crop and climatic characteristics of the area under consideration. The second method is Neal Formula to design spacing and depth of tile, based on moisture equivalent and texture of the soil, it also be used in the layered soil profile for design tile drains.

一、引 言

平坦地區之地下水位經常很高，欲控制某限度之地下水位必須埋設平行排水管，其適合之間距在排水規劃上為甚重要之問題，有時甚難決定，特別在無灌溉系統地區。適當排水管之間距與各種條件有相互影響，如排水線深度，較低滲透率地層深度，土壤之滲透性，排出容量，作物生長所需土層通氣深度，灌溉實施與深層滲漏，灌溉季節之長短，灌溉次數，氣候條件及灌溉水質等皆影響排水線之間距。欲預先估計排水線之間距與工程費，必須調查附近已成功排水工程之土質、地形、氣候及其他性質，仿照各因子相互影響以作估計之根據，否則必須以數學公式計算其間距與埋設深度。

估計排水暗管間距之方法甚多，大多數皆為經驗方法用於特殊之地區，且假定為定流。美國墾務局假定不定流以各不同土壤之物理性質求得計算間距公式與圖解（如圖 1, 2 所示），此法適用於濕潤或灌溉地

區，地下水流動於土層中之情況，並證實以此圖解求得之排水間距與降低之地下水位與實際量測者相同，故此法可用於任何特殊地區，雖僅適用於平坦地區，但亦可應用於正常有地表灌溉坡度之地區。另外有奈爾 (Neal) 公式計算暗管排水之間距與深度方法一併說明以下各節。

二、美國墾務局計算排水間距之條件

在灌溉地區地下水位過程線有下列特性：灌溉季節地下水位慢慢上昇，及之最後一次灌溉，地下水位達最高點或灌溉季節作物達高峯耗水量時地下水位最高，反之，非灌溉季節地下水位慢慢降低，直至下一灌溉季節第一次灌溉前，地下水位為全年最低者，因此每一地區依降雨或灌溉水量與次數，即可推知地下水位昇降之過程。如每年灌入水量（包括雨水與灌溉水）與全消耗水量不平衡或超過時，則地下水位逐漸上昇，如每年二者水量相等時，地下水位之昇降亦會成平衡狀態，此種情形特別定名為動力平衡 (dynam-

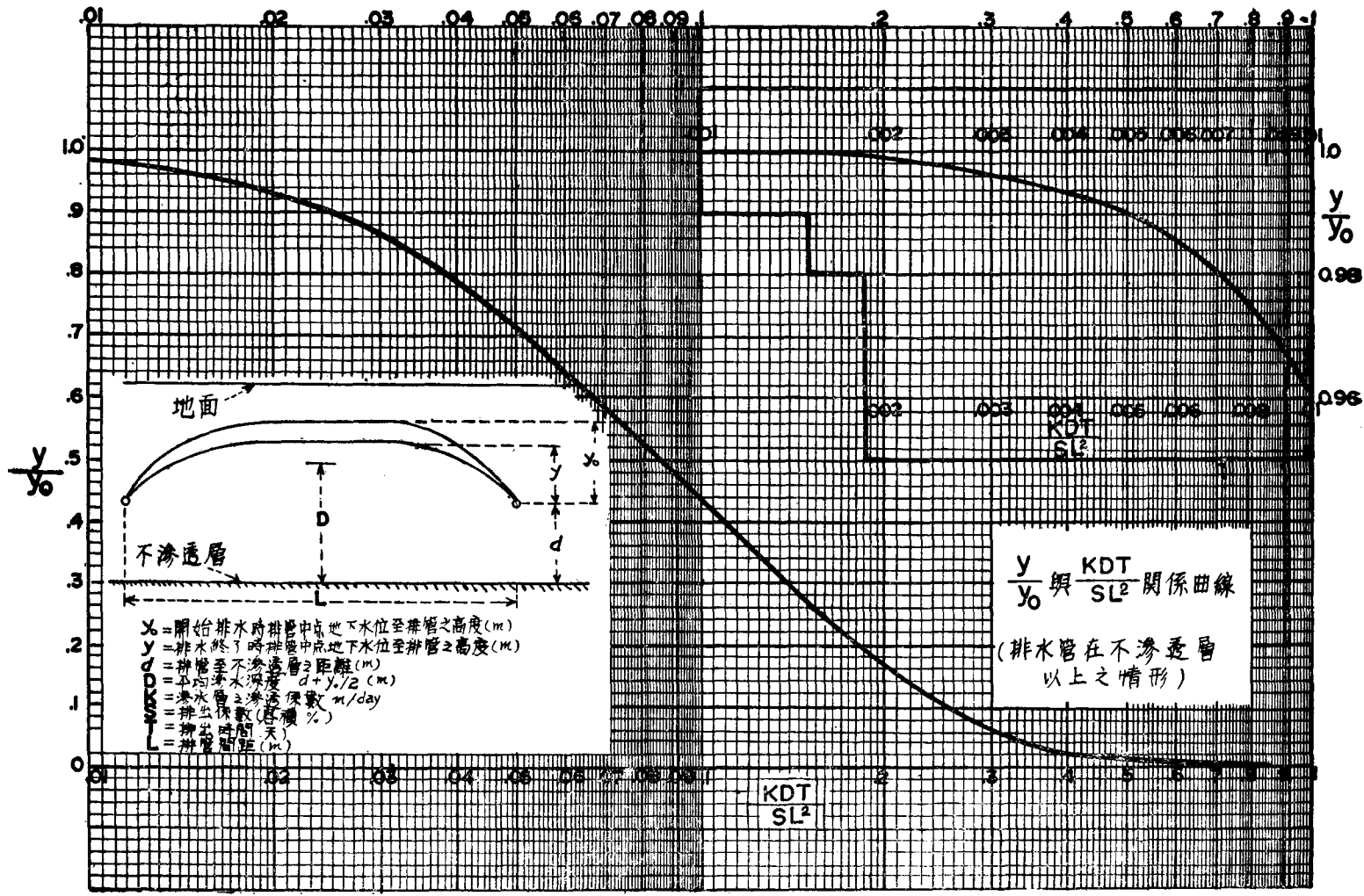
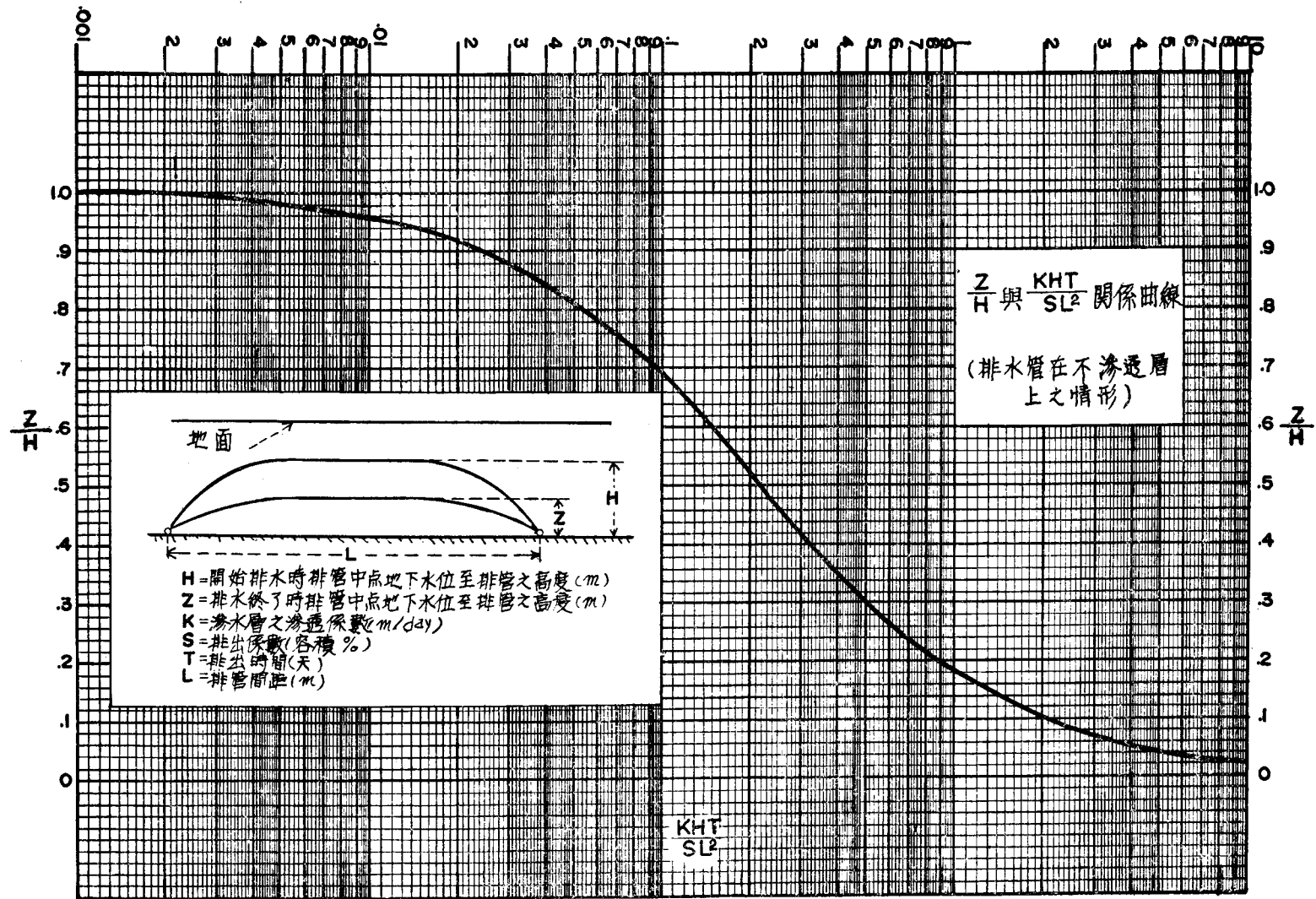
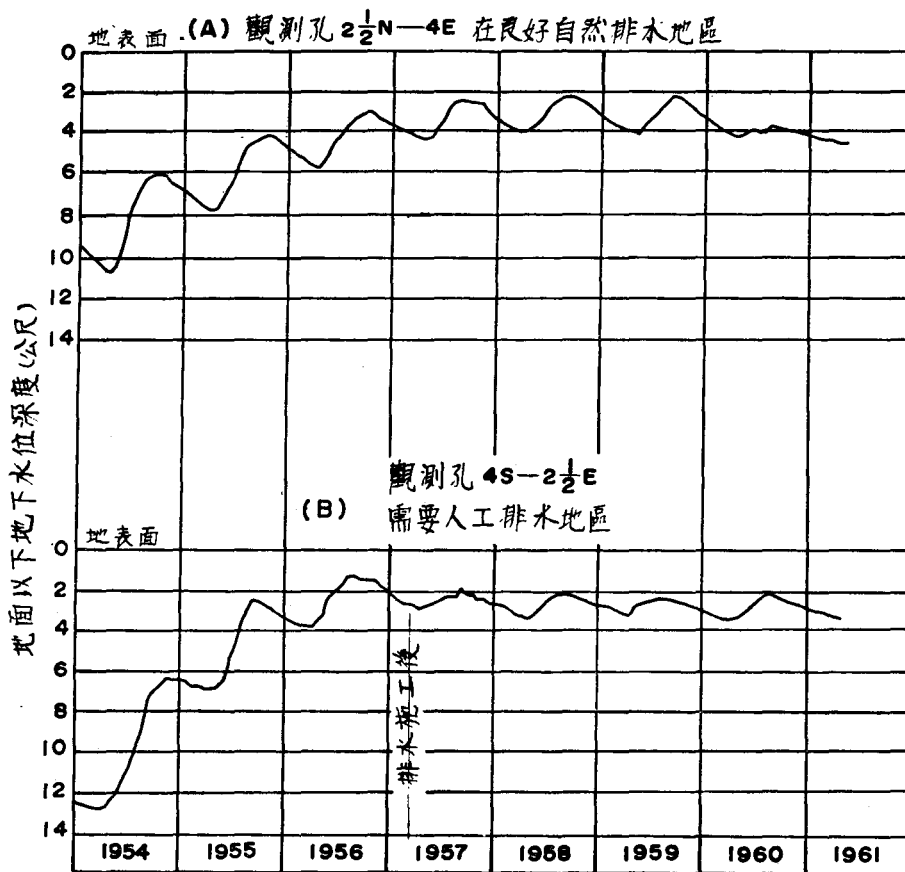


圖 一



mic equilibrium) 圖 3 為在二不同特殊地區實施灌溉地下水水位過程線圖，圖 3 A 因每年進入與消耗

之水量相等，其上升後之地下水水位可恢復到原高度，此即為動力平衡，地下水水位最高點之高度在作物根系



圖三 地下水水位過程線

下，此點即為人工排水後應有之地下水水位高度；換言之，地下水在此種高度時，土壤內所含之水分即為適當灌溉與自然排水後所具之狀態。圖 3 B 為另一區域地下水過程線圖，由圖可知地下水水位在 1956 年最高，如繼續升高將來會嚴重影響作物之生長，即於 1957 年春建築排水工程，此後地下水水位之變動成動力平衡，水位不再升高矣。

美國墾務局計算暗管排水間距之公式即以上述之動力平衡地下水水位為依據，在各種不同土質，灌溉，作物與氣候之條件下設計符合各地下水水位之間距。

三、美國墾務局法設計所需之資料

圖 1 與圖 2 所示之曲線根據不定流之原理為 y/y_0 與 KDt/SL^2 及 Z/H 與 KHt/SL^2 之關係，其目的各為求解排水管在不滲透層以上或在不滲透層二管中

間地下水水位降落深度，式中各文字之定義參看圖中說明，各項目之討論說明如下：

1 y_0 及 H 表示開始排水時，排水管上任何點地下水水面高度，如用於計算排水間距時，代表降雨與灌溉時因滲漏而升高之瞬間地下水水位或非灌溉季節地下水水位開始降低時瞬間之地下水水位，其最大值必須考慮作物根系之通氣程度及各地之氣候條件。

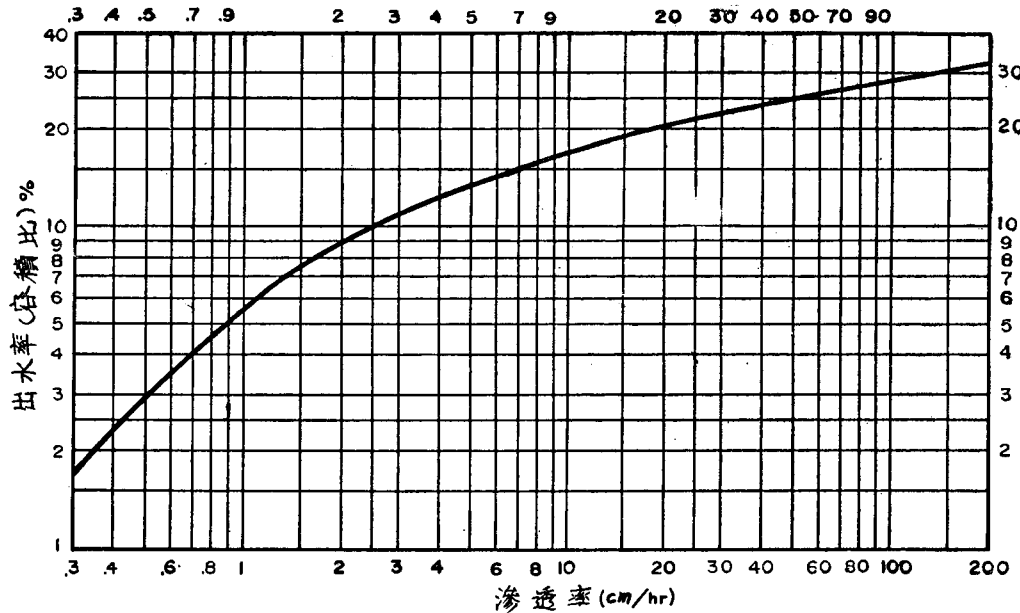
2 y 及 E 表示排水完了時，排水管上任何點地下水水面高度，亦即任何時間各不同土質二排水管中間點地下水水位降低之高度。

3 滲透係數 K ：用此公式計算間距時之滲透係數係暗管以上至地下水水面最高點土層之平均值，求 K 值時理論上假定此層土質為均勻者，實際上此種情形甚少見，因此求 K 值時考慮各不同土層，分別實測或計算其值，然後求其平均值，方可代入公式中計算暗

管之間距。

4 出水率：排水土層中由於重力作用，自各種不同土質飽和狀態時所排出之水量，其單位為土體容量之百分比，依土質不同其值約在飽和水分與田間容

水量之間。因此出水率與地下水位變動高度及土層中流進流出之水量有關，在實際應用上可用滲透係數的關係求得各不同土質之出水率（參看圖4），再由出水率代入公式即可估計排水管間距。



圖四 出水率與滲透率關係曲線

出水率在圖4中為不名數，可代表地下水位昇降程度，如計算水量增加而提高地下水位，可以增加水量之水深除以出水率而得。

5 時間 t ：乃表示水量排出時間，亦就是灌溉前後相隔之時間，或非灌溉季節，地下水位因排水而降低之時間；灌溉地區灌溉期距業已決定，在決定暗管排水間距時，如無灌溉季節時，可用作物生長時間來代替，然後將一年之天數減去灌溉季節天數即為非灌溉季節天數。

6 水流深度 D ： D 表水排入管中時，土層平均之水流深度，此值等於排水管至不滲透層距離加上地下水位最高點至排水管之半，即 $D = d + y_0/2$ 。

在圖2之情形管子位置在不滲透層以上而剛在不滲透層，因此 d 值甚少， d 值亦不會比 y_0 之最大值為大，為求圖2之應用曾研究得一結果即 $d/y_0 \leq 0.1$ 管距之計算乃根據管子在不滲透層之情況； $d/y_0 \geq 0.80$ 時，管距計算為根據不滲透層以上之情況，然 d/y_0 值在 $0.1 \sim 0.8$ 之間時尚未得到答案，可能可用於上列二種情況。同時研究結果又指出，如不滲透層深度大於管距之 $1/4$ 時，此公式則不適用。

7 排水管間距 L ：表示排水平行系統之間距，此值不能用此法直接計算，但先假定 L ，然後以不同條件及每年地下水位昇降之情形去求 L 值，校驗與假定值是否相符。

當地下水流入暗管時，水流面積定會縮狹，由此排水系統中有一水頭損失，此值在計算間距時必須考慮在內。在圖1中所求得之間距尚未計及因水流面積縮狹而發生之水頭損失，因此所求得之間距較大，下式為自圖1中求得間距後之校正公式：

$$\text{校正值} = D \log_e \frac{D}{4r}$$

式中 D 為平均流水深度 (m)

r 為排水管外徑加包圍碎石厚度或管槽底寬之半。(m) 圖2已計及因水流面積縮狹而發生之水頭損失，故不必再校正。

四、美國墾務局設計暗管排水公式或圖解之應用

上節已討論各資料之性質，本節以動力平衡之條件說明公式之用法，繼之在下節舉出詳細之計算例，

因此讀者參照此三步驟可作實際之應用。

應用公式之初步工作為假定管距 L ，其假定條件為在灌溉季節最後一次灌溉後所發生管子以上之地下水水位 y_0 為最高容許之地下水水位，管間中點地下水水位位置之計算法須依照非灌溉季節水位之降落與灌溉季節水位上昇之過程來決定，如動力平衡條件已符合管距之假定值則在灌溉季節最後一次灌溉時，地下水水位將再會回復到容許最高高度 y_0 。簡言之，上法用預定之條件以試求法求管距，水位上昇與下降以一年之週期為依據。

通常此法必須假定管距為先，然後校驗動力平衡條件及管上地下水水位高度 y_0 及動力平衡條件，如原假定條件皆甚合理並接近適合之管距，則完成一年週期後， y_0 與假定之管距成直線關係。

五、排水管在不滲透層以上管距設計例

設不滲透層至排水管之距離 d 為 0.67 公尺，管子深度為 2.44 公尺，根系深度 1.22 公尺，亦即排水管以上最高水位不得超過 1.22 公尺，不滲透層以上至最高地下水水位土層之平均滲透率為 12.5 cm/hr 自圖 4 可求得出水率為 18%，融雪及灌溉時之深層滲漏為 0.0253 公尺，因此地下水水位昇高值為灌溉深層滲漏除

以出水率 即 $0.0253/0.18=0.14$ 公尺，融雪及灌溉日期如表 1 所示：

表 1 排水區灌溉時期與灌溉期距表

融雪及灌溉次別	日期	灌溉期距 (日)
融 雪	4 月 22 日	
第一次灌溉	6 月 6 日	45
第二次灌溉	7 月 1 日	25
第三次灌溉	7 月 21 日	20
第四次灌溉	8 月 4 日	14
第五次灌溉	8 月 18 日	14
第六次灌溉	9 月 1 日	14
計		132

由上表可知非灌溉季節即無水加入此區域之日數為 $365-132=233$ 日。

由實際資料可知最大容許地下水水位高度發生在最後一次灌溉後不久，計算亦自此時開始。第一步即計算第一時期之 KDt/SL^2 值，由第 1 圖不難求得 y/y_0 值，已知 y_0 即可求得該時期地下水水位最高點之高度 y ，繼續以上步驟計算各時期地下水水位高度，計算法如表 2 所示：

表 2 假定管距 440 公尺時管子在不滲透層以上地下水水位變動計算法

灌溉次數 (1)	t 日 (2)	地下水水位昇高值 m (3)	y_0 m (4)	D m (5)	KDt/SL^2 (6)	y/y_0 (7)	y m (8)
6	117		1.22	7.32	0.0735	0.566	0.697
	116		0.69	7.05	0.0714	0.580	0.40
融雪	45	0.14	0.54	6.98	0.0272	0.877	0.47
1	25	0.14	0.61	7.01	0.0152	0.958	0.59
2	20	0.14	0.73	7.07	0.0123	0.978	0.71
3	14	0.14	0.85	7.13	0.0087	0.985	0.84
4	14	0.14	0.98	7.20	0.0087	0.985	0.96
5	14	0.14	1.10	7.26	0.0088	0.985	1.09
6		0.14	1.23				

表中第(1)(2)列即為表 1 之數據，117及116之和即為非灌溉時期日數；第(3)列即灌溉深層滲漏水深除以排出係數所得之商，即每次補注水後所增加之瞬間地下水水位。第(4)列每次灌溉後，二排水管中間之地下水水位高度，亦即非灌溉前之地下水水位(8)加上第(3)列相應之數字，第(5)列為平均流水深度即 $d+y_0/2$ (式中 d 值必須小於 $L/4$)，第(6)列為代表任何排出時期之水流狀況即 $\frac{K}{SL^2} \times (2) \times (5)$ ，第(7)列自圖 1 中求得，

第(8)列為每時期排水後二管中點之地下水水位即(4)×(7)

所假定之間距 440 公尺，依表 2 計算之結果僅適合管子以上之水位不超過 1.23 公尺時，由三節⑦說明此結果尚未計及水流收縮情況，下示即為校正值計算之一例：

由表 2 可知平均水流深度 D 為

$$D = \frac{7.32+6.98}{2} = 7.15$$

r 值為排水管外側半徑加上周圍碎石厚度，

現設內徑15公分之外半徑加上碎石厚度10公分則 $r=0.19$ 公尺

則其效正值為

$$C = D \log_e \frac{D}{4r}$$

$$= 7.45 \log \frac{7.15}{4(0.19)} = 15.8 \text{ m}$$

則修正後之排水管間距為 $440 - 16 = 424 \text{ m}$ 採用 420 m

六、排水管在不滲透層上管距之設計例

排水管在不滲透層上管距之設計與上例大同小異，除不滲透層深度外，所有之條件皆與上例同。計算時亦先假定管距，與上例同，依各不同灌溉次數繼續計算地下水位高，惟所用之計算曲線則異，應採用圖 2 計算時試算為必要採用之方法，計算後之管距如表 3 所示不必再修正。

表 3 假定管距 143m 時管子在不滲透上地下水水位變動計算法

灌溉次數	t 日	地下水位昇高值 (m)	H (m)	KDt/SL ²	Z/H	Z (m)
6	117		1.22	0.1180	0.655	0.80
	116		0.80	0.0770	0.745	0.59
融雪	45	0.14	0.73	0.0273	0.980	0.65
1	25	0.14	0.79	0.0163	0.932	0.74
2	20	0.14	0.88	0.0145	0.940	0.83
3	14	0.14	0.97	0.0112	0.953	0.92
4	14	0.14	1.06	0.0123	0.949	1.00
5	14	0.14	1.15	0.0132	0.945	1.08
6		0.14	1.22			

七、奈爾 (Neal) 式設計暗管間距與深度

1934年 Neal 氏根據土壤之水分當量及地下水曲線下降速率，在潮濕地區平坦地暗管排水之間距與深度關係得一統計分析之經驗公式為：

$$d = \frac{5.33}{(Me)^{0.6}} \dots\dots\dots(1)$$

$$S = \frac{670}{(Me)^{1.6}(Rd)^{1.43}} \dots\dots\dots(2)$$

式中 d 為暗管之埋設深度 (m)

S 為暗管之間距 (m)

Me 為暗管以上土層深度平均水分當量(%)

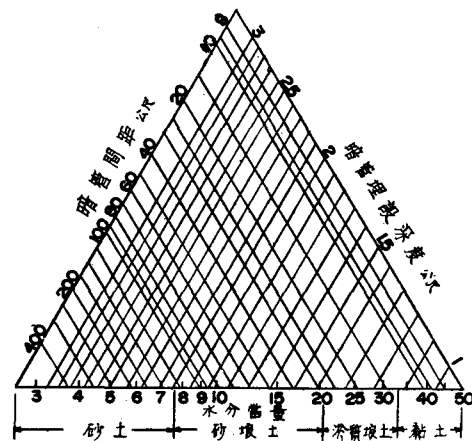
Rd 為暗管中央每天地下水水位降低高度(m)

(2) 如假定暗管中央每天地下水水位降低 30 公分時則 6 式可改寫為：

$$S = \frac{3658}{(Me)^{1.6}} \dots\dots\dots(3)$$

為求應用方便如已求得排水區土層中之平均水分當量即可由圖 5 查得，甚為便利。

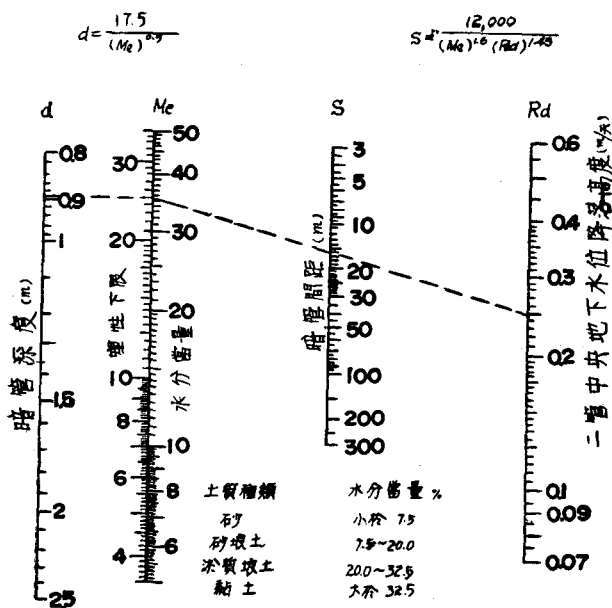
如每天管中央下降深度非為 30 公分，則可用圖 6 求得。



圖五 Rd=30cm 時用土壤水分當量求管深與間距圖解

例：設排水區土層中之平均水分當量為 35.7%，每天管中央水位降低 24 公分，求暗管之間距與埋設之深度。

解：在圖 6 連接 $Me=35.7$ 及 $Rd=24$ 公分，連線與 S 刻度線得一交點 16.5 公尺即為所求之間距，自 Me 刻度線上 35.7 處再向左繪一水平線在 d 刻度線相交於 0.89 公尺即為相應暗管應埋設之深度。



圖六 暗管排水管距與管深之關係圖解

以上二法所求得之暗管間距與深度僅限於土層之土質分佈為均勻一致者，如為層狀土壤或某深度處有硬盤而不能埋設時，可用下面方法處理：

1. 層狀土壤暗管間距與深度之設計：排水區次層土壤非同一土質，亦即各土層中水分當量不同，此種地區暗管間距與深度之設計，應先求得各不同土層之水分當量再求平均值，然後依上法求暗管之間距與深度，茲舉例說明如下：

設排水區之作物為甜菜、玉蜀黍及苜蓿，根深為 0.75~1.5 公尺，平均為 1.15 公尺，暗管所需深度為 1.2 公尺，所需暗管中央最大下降速率每天為 15 公分，土壤剖面各層深度及其水分當量值如下表 4

表 4 層狀土壤暗管間距與深度計算表

各層深度 (m) (1)	水分當量 (%) (2)	(1) × (2) (3)	標準間距 (m) (4)	標準深度 (m) (5)	(3) × (4) (6)	(3) × (5) (7)
0.20	21.5	4.3	73.0	1.26	314	5.40
0.40	13.0	5.2	168.0	1.50	870	7.80
0.15	11.5	1.7	198.0	1.55	337	2.64
0.45	23.0	10.0	67.0	1.12	670	11.20
計 1.20		21.2 平均 Me 17.7			2,191 平均 S 103m	27.04 平均 d 1.27m

由上表可知，此層狀土壤暗管之間距為 103 公尺，埋設深度應為 1.27 公尺。

2. 土層某深度有硬盤必須改變埋設深度時之設計：

由達西原理及比例法可將暗管原設計之間距改成

$$S' = \left(\frac{d'}{d} \right)^{\frac{1}{2}} \times S \dots\dots\dots(4)$$

式中 S' 為擬改變暗管埋設之間距 (m)

d' 為擬改變暗管埋設之深度 (m)

其他文字與(1)、(2)式同。

例：設暗管中央地下水水位降低高度每天為 15 公分，水分當量為 16%，由圖 6 可求得間距為 118 公尺，深度為 1.35 公尺，惟 1.35 公尺處有硬盤不能埋設，只能埋設於 0.98 公尺處，則暗管間距應如何更改？

解：由公式(4)

$$S' = \left(\frac{d'}{d} \right)^{\frac{1}{2}} \times S$$

$$= \left(\frac{0.98}{1.35} \right)^{\frac{1}{2}} \times 118 = 100 \text{ 公尺}$$

由上面之計算，如暗管由 1.35 公尺改埋至 0.98 公尺深度處，暗管間距亦應由 118 公尺改至 100 公尺。

主要參考文獻

1. Bureau of Reclamation U.S.A.: Land Drainage Techniques and standards. 1964
2. Soil conservation service USDA: Drainage 1959
3. James N. Luthin: Drainage Engineering, University of California, Davis, U.S.A. 1966
4. Harry Burgess Roe & Quincy Claude Ayres: Engineering for Agricultural Drainage, McGraw-Hill, 1954
5. McLaughlin Engineers: Urban Storm Drainage Criteria Manual Vol. I & II, Denver, Colorado, U.S.A. 1969
6. 中國農業工程學會：灌溉排水工程規劃手冊 民國 55 年
7. 施嘉昌 排水工程講義 民國 60 年