

暗キヨ排水の機能増進に関する研究

VIII 暗キヨ排水間隔の決定

田 地 野 直 哉

STUDIES OF ENLARGED PROPERTY OF UNDERDRAINAGE

VIII. Determination of drain spacing

Naoya TAJINO

We have many methods to determine the spacing between drain tubes of the underdrainage. The author examined several experiential and theoretical methods, and then partly modified these methods.

In case of the lowering of the groundwater table by underdrainage, the author proposed a new coefficient, a seepage coefficient " u ", since " f " (porosity of the soil, drainable pore space) by using the theoretical methods has a drawback.

As already shown in the last report, the value " u " is transformed by the lowering of the groundwater table stored in the pores of the soil with the gravitational water.

Table 9 shows the spacings between drain tubes of the underdrainage, we showed how to calculate the spacings under the specified hydraulic conditions.

暗キヨの間隔を決定するとき単位地下排水量 Q/L を一定とする場合 (暗キヨ排水量からの検討) とある水位まで排水時間 T を一定とする場合 (地下水位低下速度からの検討) がある。前者の考えに近いものとして SCHRODER の表があり、後者には著者の誘導式や TOKSOZ and KIRKHAM, DELACROIX の式などがある。

SLATER による値や深さの10~15倍によって求める場合は Q/L , T がそれぞれ一定の場合の中間的関係にある。このことについては間隔比の検討において報告する。

なお、著者の誘導式は前回報告⁽¹⁾した浸出係数 u の応用である。また、暗キヨ排水の間隔の決定には経験的なものと理論的なものがあり、理論的なものの中にも定常と非定常の2つの条件があるが本報告の誘導式は非定常なものであって浸出係数から求める方法である。

本報告は暗キヨ排水吸水管の間隔を決定する諸式の簡単な紹介と誘導式について説明を加え、同一条件のもとでの暗キヨ間隔の計算を示して比較した。

I はしがき

最近の圃場整備事業によってひきおこされるデメリットは土の大量移動が透水性の破壊をきたすことや、土地改良の発展のために大旱魃による自然改良の停止などが考えられる。また、耕地区画の大型化にともなって暗キヨ排水の深さおよび間隔の決定に自由性が生じたことや、機械化當農の作業性を高めるために地耐力強化が必要になったことなどが今までより合理的な設計施工が必要になった新しい条件である。

暗キヨの深さは水理学的には地表から暗キヨ管中心までの垂直距離であって、施工的には暗キヨ管底面まで、農作業上からは暗キヨ管頂部までの垂直距離をいうのが普通である。ここでは計算において水理学的深さを主として使い、単に深さというときは施工深さが使われる。

暗キヨの深さは間隔の決定に先立って決めるのが普通であって、排水路の深さおよび水位に規制されるが土質の差および作目によって経験的に求められている。水稻の場合は0.8~1.25mとされている。なお土壌条件によっては透水性の良い部分に暗キヨを入れることが大切である。特に粘土質土壌の場合にはキレツが透水性の主要因となって均一土壌として地下水流動を考慮することができない場合があるので計画のとき注意しなければならない。愛知県高須地区(昭和38~42年学会水田モデル試験地, 農土誌36巻8号)の例では暗キヨの深さが浅い方(0.9~1.2mの範囲で試験)が排水量が多い結果を得ている。(2) これは同地区が整地前にクリーク水田であったために埋立て部のみ砂壤土で土層が平面的に不均一であることが大きな原因であることと、既耕地部のキレツの到達深さが1m以内の浅目であることによっている。

一般に施工直後の透水性が最低であって、施工後年々透水性が増すのでどの時点で透水係数を測定するか問題があるが、少なくとも施工後1年の経過を予想して隣接した類似地のデータを参考にして決めるべきである。高須地区における試験地約18haについて排水路水位と日減水深の変化から平均的な土層の透水係数を計算した結果では施工後2年(昭和39年)に $k=3.9 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ を示し、また3年後に $k=5.0 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ を示した。

泥炭地においては排水にともなって地盤沈下を生ずるので暗キヨの深さは1~1.2m程度の深めにすべきである。北海道サロベツ地区における排水工法試験(3)によれば泥炭の質によってもことなるが、暗キヨの深さ0.6mに埋設して整地後5ヵ年で地表が0.5m沈下し、暗キヨの深さは0.4~0.5mとなって施工時の70~80%を示している。したがって計画の20~30%増の深さに施工することが必要である。

II 暗キヨ排水の間隔決定のための諸式

間隔の決定において一般に計画される区域について考え、成層土壌として土層の垂直的な違いに気をとられないで地区の平均的透水性をもとに決定することが賢明である。

間隔の決定には経験的なものと理論的なもの、および暗キヨ排水量をもとにする場合と地下水位低下に要する時間をもとにする場合など多くの考えがあるので、どれか一つの結果のみで満足せず幾つかの方法を使って間隔を求め比較検討することが大切である。

本報告ではつぎのようにわけて検討した。

- | | | |
|--------|---|----------------------------|
| 経験的なもの | } | 1 深さの10~15倍 |
| | | 2 土質による決め方 |
| | | 3 数式による決め方 |
| 理論的なもの | } | 4 TOKSOZ and KIRKHAM の図式解法 |
| | | 5 HOOGHOUTD の式による決め方 |
| | | 6 浸出係数による決め方 |
| | | 7 GLOVER の式による決め方 |
| | | 8 WALKER の式による決め方 |
| | | 9 地下水低下係数による決め方 |

1 深さの10~15倍

暗キヨ深さの10~15倍(粘土~砂土)とし、さらに広大な平坦地区では約1.8倍まで広げる。

2 土質による決め方

田中貞次, SCHROEDER, SLATER の例を示すと Table 1, 2, 3である。Table 1の土性は clay (粘土), loam (壤土), sand (砂土), peat (泥炭)であって、泥炭は北海道のデータ(8)から著者が求めた。

SCHROEDER による Table 2 は基準水量として600~650mmが採用されているから、わが国のような平均年降雨量1000~2800mmの多雨地帯では間隔を狭くする必要があるといわれている。()内の泥炭については Q/L を一定としたときの間隔比と北海道のデータ(8)から著者が求めた。なお、Table 2の土性は heavy clay (重粘土), clay (普通粘土), clay loam (粘質壤土), loam (普通壤土), peat (泥炭), sandy loam (砂質壤土), silt (壤質砂土), sand (砂土)である。

Table 1 Relation between nature of soil and underdrainage spacing by TANAKA TEIJI

soil texture	spacing, meters
clay	10~14
loam	14~20
sand	20~24
(peat	12~18)

note: depth 1.25 m, (), converted value by author

Table 2 Relation between nature of soil and underdrainage spacing by SCHROEDER, GERHARD

soil texture	grading <2mm, weight ratio%	depth drain tube center below surface, meter			
		0.8	1.0	1.2	1.4
heavy clay	100~75	6~ 8	6.5~ 8.5	7~ 9	7.5~ 9.5
clay	75~60	8~ 9	8.5~ 10	9~ 11	9.5~11.5
clay loam	60~50	9~ 10	10~11.5	11~12.5	11.5~13.5
loam	50~40	10~11.5	11.5~ 13	12.5~14.5	13.5~ 16
(peat		10.5~13.5	12~ 16	13.5~18.5	15~ 21)
sandy loam	40~25	11.5~14.5	13~ 17	14.5~19.5	16~ 22
silt	25~10	14.5~18	17~ 22	19.5~ 26	22~ 30
sand	<10	>18	>22	>26	>30

note: (), converted value by author

Table 3 Relation between coefficient of water permeability and underdrainage spacing by SLATER

coefficient of water permeability, cm/s		depth drain tube center below surface, meter		
		0.9	1.2	1.5
0 ~	3.5×10^{-5}	0 ~4.5	0 ~ 6	0 ~7.5
3.5×10^{-5} ~	1.4×10^{-4}	4.5~ 9	6 ~ 12	7.5~ 15
1.4×10^{-4} ~	5.6×10^{-4}	9 ~ 18	12 ~ 24	15 ~ 30
5.6×10^{-4} ~	1.7×10^{-3}	18 ~ 32	24 ~ 43	30 ~ 54
1.7×10^{-3} ~	3.5×10^{-3}	32 ~ 46	43 ~ 61	54 ~ 76
3.5×10^{-3} ~	7×10^{-3}	46 ~ 66	61 ~ 87	76 ~108

3 数式による決め方

一般に使われている DELACROIX の式は(1)式であって、傾斜地に使われる式としては SAINT VENANT の(2)式がある。

$$L = 2(H - h_1 - h_2) / \tan \beta \dots \dots \dots (1)$$

$$L_a = 2(H - h_1 - h_2) (\tan^2 \beta - \tan^2 \gamma)^{0.5} / (\tan^2 \beta - \tan^2 \alpha) \dots \dots \dots (2)$$

L, L_a: 吸水間隔

H: 吸水管の深さ

h₁: 暗キヨ間中央部の地表からの地下水深

h₂: 暗キヨ直上部の吸水管中心からの地下水高

tan α: 地表面の最大コウ配 (等高線に直角方向のコウ配)

$\tan\beta$: 地下水位コウ配

$\tan\gamma$: 吸水管のコウ配

諸元を Fig.1 に示す。なお DELACROIX は実験から Table 4 に示すように h_2 , $\tan\beta$ の値を求めている。 h_1 の数値については $\tan\beta$ とともに地区別に土壤調査をおこない、実験数値を求めて利用する。新潟県が得た例を示すと、実験値による $\tan\beta$ は Table 5 であった。なお、Table 4 の土性は clay (粘土), sand (砂土) および heavy clay (重粘土), clay (普通粘土), pervious soil (透水性土壤), cretaceous soil (白亜質土壤) である。

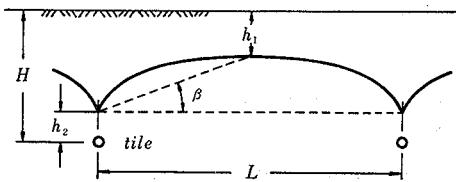


Fig. 1 Symbols of DELACROIX's equation

Table 4 " h_2 " and " $\tan\beta$ " values of DELACROIX's equation

soil texture	values of h_2 , meter	
	maximum	mean
clay	0.34	0.25
sand	0.30	0.14

soil texture	values of $\tan\beta$
heavy clay	0.09
clay	0.07 ~ 0.08
pervious soil	0.025 ~ 0.03
cretaceous soil	0.015 ~ 0.02

Table 5 Measured values of " $\tan\beta$ " with grade of groundwater table (BUNSHI TYO, NIIGATA prefecture)

station number	drainage canal of BUNSHI TYO SAZEN farm, humic soil					BUNSHI TYO NAKAJIMA farm, clay					
	depth canal water table below surface, meter	distance, meter	difference of elevation, meter	depth groundwater table below surface, meter	$\tan\beta$	depth canal water table below surface, meter	distance, meter	difference of elevation, meter	depth groundwater table below surface, meter	$\tan\beta$	
1	0.35	40	+ 0.02	1.45	0.0270	0.37	25	+ 0.04	1.35	0.0376	
2	0.30	"	"	1.50	0.0295	0.36	"	+ 0.02	1.27	0.0348	
3	0.27	"	"	1.43	0.0285	0.27	"	"	1.17	0.0352	
4	0.28	"	0	1.38	0.0275	0.32	"	0	1.14	0.0328	
5	0.25	"	"	1.37	0.0280	0.30	"	"	1.27	0.0388	
mean	0.29	"	+0.0125	1.426	0.0281	0.324	"	+ 0.016	1.236	0.0358	

(1)式の係数 $\tan\beta$, h_1 , h_2 の値をどのようにして決めるかは複雑なので実用的に透水係数 k と関連づけてつぎのように考え、MODIFIED DELACROIX'S eq. として(3)式および(4), (5), (6), (7)式を誘導した。

まず、各土壤に対応する透水係数 k は農業土木ハンドブック、旧台湾総督府設計歩掛表、最上・土質力学、三木・土質力学演習などを参考にし、また Fig.1 の諸元において $\tan\beta$, h_2 は前記 DELACROIX の係数である Table 4 から著者が推定した値であって Table 6 に示した。なお Table 6 の h_1 の値については後記するように岐阜県高須モデル圃場試験地⁽²⁾でのデータから好結果を示した暗キヨを基準暗キヨとして、その条件 $k=3.6 \times 10^{-6} \text{m/s}$ 、暗キヨの深さ $H=0.9\text{m}$ 、間隔 $L=11.8\text{m}$ (Table 9 の平均) を使って SLATER の Table 3 と間隔比 n (間隔比については次回報告の予定である。) の関係から求めた。したがって(1)式において H が 1.25m のとき、間隔比が 1 になるようにして(3), (4)式を得た。

Table 6 から k と $\tan\beta$ の関係は数式にすると(5)式となり、図示すると Fig.2 となる。また k と h_1 , h_2 の関係はディメンジョンを無視して数式にすると(6), (7)式となり、図示すると Fig.3 となる。ただし $\tan\beta$, h_1 , h_2 の

値について k が 10^{-8} m/s 以上および 10^{-8} m/s 以下の場合は除外する。

$$L = 2n(1.25 - h_1 - h_2) / \tan\beta \quad (\text{m単位}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$n = 0.8H \quad (\text{m単位}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\tan\beta = \frac{0.09 + 7.2 \times 10^3 k}{1 + 4.1 \times 10^5 k} \quad (\text{m単位}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$h_1 = 0.47 - (0.039 \log_{10} k + 231k) \quad (\text{m単位}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$h_2 = \frac{0.34 + 9.1 \times 10^4 k}{1 + 7.59 \times 10^5 k} \quad (\text{m単位}) \quad \dots\dots\dots (7)$$

Table 6 DELACROIX'S coefficients with author arranged

soil texture	h_2 (m)	h_1 (m)	k (m/s)
heavy clay	0.34	0.79	10^{-8}
clay	0.25	0.70	10^{-6}
pervious soil	0.14	0.67	10^{-5}
cretaceous soil	0.12	0.36	10^{-3}

Fig. 2 Relation between "k" and "tanβ" of DELACROIX'S equation

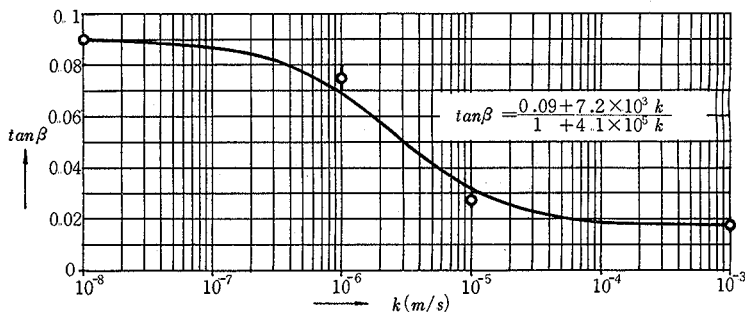


Fig. 3 Relation between "k" and "h1, h2" of DELACROIX'S equation

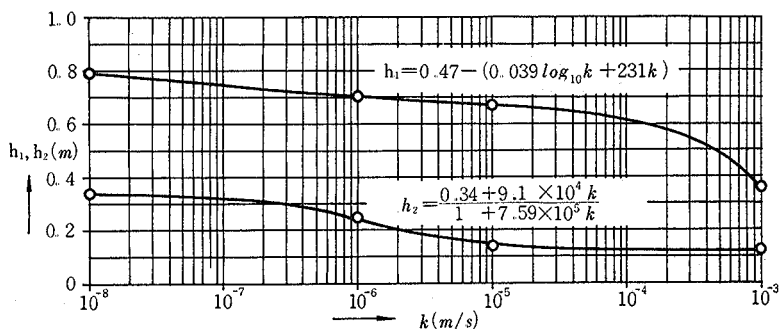


Table 6 の h_1 の値を決める過程をつぎに示す。

SLATER が示した暗キヨの深さ別透水係数 k と間隔 L の関係である Table 3 の値を両対数方眼紙に k と L の関係として画くと直線を示すので、この直線と前記基準暗キヨ（岐阜県高須モデル圃場試験地のデータによるもので、 $k=3.6 \times 10^{-6}$ m/s, $H=0.9$ m, $L=11.8$ m) をプロットした位置から平行な直線を引き、この直線上で Table 7 を得る。ただし 10^{-8} , 10^{-3} m/s のときの値は著者の推定である。

ここで(4)式から $H=0.9$ m の値 $n=0.72$ のとき(3)式を使って Table 7 を満足する h_1 を求めると Table 8 を得る。

Table 7 Relation between "k" and "L" in case of H=0.9 meter

k(m/s)	10 ⁻⁸	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻³
L(m)	2.0	6.2	20.0	63.0

Table 8 Relation between "k" and "h₁"

k(m/s)	10 ⁻⁸	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻³
h ₁ (m)	0.79	0.70	0.67	0.36

以上によって現地透水係数 *k* がわかれば(4), (5), (6), (7) 式から *n*, *tanβ*, *h*₁, *h*₂が求められ。(3)式から暗キ₀間隔 *L* が得られる。なお, (5), (6), (7) 式のかわりに Fig.2, 3, の図表から *tanβ*, *h*₁, *h*₂ を求めてもよい。

4 TOKSOZ and KIRKHAM の図式解法

地表に一定降雨または一定過剰水がある場合の暗キ₀間隔決定図解法を KIRKHAM によって示されたのが巻末参考資料に示した TOKSOZ & KIRKHAM の図(4) であって不透水層の位置が有限のときと無限大のときに分けてある。

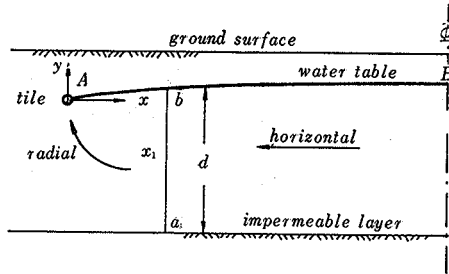
なお、一般にわが国水田の場合は図表中の降雨強度 *R* の値を非かんがい期間(9~5月)における最大月雨量の確率1/10値から求めた単位地下排水量 *q* に等しくとってよいようである。数式の諸元は TOKSOZ & KIRKHAM の図の概要図に示されている。

5 HOOGHOUDT の式による決め方

HOOGHOUDT(1937) (5) は放射流と平行流の組合せにもとづいて(8)式を得ている。概要図を Fig.4 に示す。

$$L = 8khd/R_0 + 4kh^2/R_0 \dots\dots\dots (8)$$

Fig. 4 Geometry and symbols used in discussion of HOOGHOUDT's equation



*R*₀ は暗キ₀間排水量である。なお, *h* は暗キ₀間中央における暗キ₀心からの地下水高さで一様な状態、一様な降雨のときによい値を与えると云われている。また *d* は(9)式のように *L*, *r* の値によって求められる equivalent depth "d_e" で置きかえて計算することを HOOGHOUDT が提案(6)している。

$$\left. \begin{aligned} d_e &= d \left\{ 1 + \frac{d}{L} \left(\frac{8}{\pi} \ln \frac{d}{r} - 3.4 \right) \right\}^{-1}, & 0 \leq d/L \leq 0.3 \\ d_e &= L \left\{ \frac{8}{\pi} \left(\ln \frac{L}{r} - 1.15 \right) \right\}^{-1}, & 0.3 < d/L \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

6 浸出係数による決め方

浸出係数 *u*⁽¹⁾ を現地試験データから(10), (11)式を使って求め(12)式で間隔 *L* を算定することができる。なお, 基準値 *a*₁ と任意値 *a* の関係には(14)式がある。*b* は土壌条件が同一なら一定とおいてよい。

$$u = a(1 - hH^{-1})^b \dots\dots\dots (10)$$

$$a = 2\pi kT \left\{ L \int_h^H (1 - hH^{-1})^b (r-h)^{-1} V dh \right\}^{-1} \dots\dots\dots (11)$$

$$T = aL(2\pi k)^{-1} \int_h^H (1 - hH^{-1})^b (r-h)^{-1} V dh \dots\dots\dots (12)$$

$$\int_h^H (1 - hH^{-1})^b (r-h)^{-1} dh = -H^{-b} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(H-h)^{b+i}}{(b+i)(H-r)^i} \dots\dots\dots (13)$$

$$a = a_1 \frac{V H_1^{2.5-b} L^{0.5}}{V_1 H_1^{2.5-b} L_1^{0.5}} \quad (14)$$

概要図を Fig. 5 に示し、数式の諸元はつぎのとおりである。

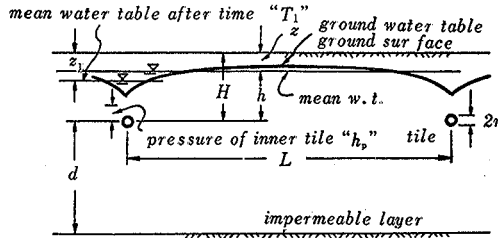


Fig 5 Geometry and symbols used in discussion of seepage coefficient equation

a : u の乗数 (透水係数不明のとき a/k をまとめて新しい a と考えてもよい)

b : u の指数

H : 暗キヨ心と地表との垂直距離 (地下水状態のときは $H=h$)

h : 暗キヨ心と任意の地下水面までの垂直距離

T : 地下水面が排水によって地表から所定の深さまで達するに要する時間

L : 暗キヨ間隔 (吸水管間隔)

k : 透水係数

r : 暗キヨ半径 (吸水体の外半径)

V : 暗キヨ排水量式の対数項で次式で示される。

$$V = \ln \frac{r(L^2+r^2)(r+2d)\{L^2+(r+2d)^2\}(4H+2d-r)\{L^2+(4H+2d-r)^2\}}{(2H-r)\{L^2+(2H-r)^2\}(2H+2d+r)\{L^2+(2H+2d+r)^2\}(2H+2d-r)\{L^2+(2H+2d-r)^2\}}$$

$d = \infty$ のとき

$$V = \ln \frac{r(L^2+r^2)}{(2H-r)\{L^2+(2H-r)^2\}}$$

V の計算において(11), (12), (13) 式のときは h を使い(14)式のときは H を使う。

d : 暗キヨ心から不透水層までの深さ

管内水圧 h_p があるときは (11), (12), (13) 式のポテンシャル項 $(r-h)$ の r および (13) 式の $(H-r)$ の r は h_p とする。(14)式の suffix number は基準暗キヨの諸元である。

7 MODIFID GLOVER'S eq. による決め方

文献(1)93p の (22), (23) 式と同一の (15), (16) 式で求められる。なお $D = \frac{H}{2} + d$ であるが, $d = \infty$ のときは $D = \frac{H}{2} + L$ とおく。

$$L = \left[-k \left\{ \frac{(h-h_p)}{h} \right\} (D\pi^2 T) \left\{ \ln \left(\frac{\pi h}{4H} \right) \right\}^{-1} \right]^{0.5} \quad \text{..... (原式) (15)}$$

$$L = \pi \left[\frac{a}{\left\{ k \frac{(h-h_p)}{h} \right\} D T} \left\{ (1-hH^{-1})^b \ln(4/\pi) + H^{-b} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(H-h)^{b+i}}{(b+i)(H-h_p)^i} \right\} \right]^{-0.5} \quad \text{..... (16)}$$

(15), (16) 式から間隔 L を算定することができる。概要図を Fig. 6 に示し、数式の諸元は前節と同一にとった。ただし $t = T$, $S = L$. h_p は暗キヨ管内の水圧である。

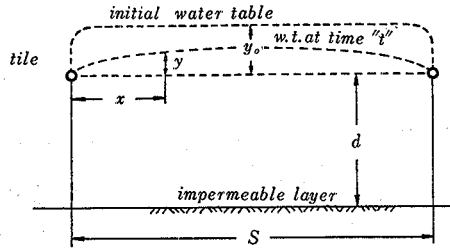


Fig. 6 Geometry and symbols used in discussion of GLOVER'S equation

8 MODIFIED WALKER'S eq. による決め方

文献(1)93pの(24), (25)式と同一の(17), (18)式から間隔 L を決定することができる。概要図を Fig. 7 に示し数式の諸元は前節および前々節と同一である。

$$T = fh \{2k(h-h_f)\}^{-1} \left[(0.25L^2 + H^2)^{0.5} - (0.25L^2 + h^2)^{0.5} - 0.5L \left\{ \operatorname{cosech}^{-1}(2HL^{-1}) - \operatorname{cosech}^{-1}(2hL^{-1}) \right\} \right] \dots\dots\dots \text{(原式)} \dots\dots\dots (17)$$

$$T = a(2k)^{-1} \int_h^H (1-hH^{-1})^b (0.25L^2 + h^2)^{0.5} (h-h_f)^{-1} dh \dots\dots\dots (18)$$

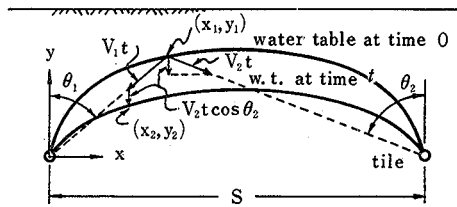


Fig. 7 Geometry and symbols used in discussion of WALKER'S equation

9 地下水位低下係数⁽⁷⁾による決め方

地下水位低下係数を $k\tilde{H}/m$ とおけば (19) 式の関係があり、変形して (20), (21) 式が得られる。

$$k\tilde{H}/m = 0.233 \frac{L^2}{T} \left\{ 0.108 + \log_{10} \frac{H_0 - h_f}{h - h_f} \right\} \dots\dots\dots (19)$$

$$\log_{10} \frac{h - h_f}{H_0 - h_f} = 0.108 - \frac{k\tilde{H}}{m} \frac{T}{0.233} L^2 \dots\dots\dots (20)$$

$$L = \left[4.28T(k\tilde{H}/m) \left\{ 0.108 + \log_{10} \frac{H_0 - h_f}{h - h_f} \right\}^{-1} \right]^{0.5} \dots\dots\dots (21)$$

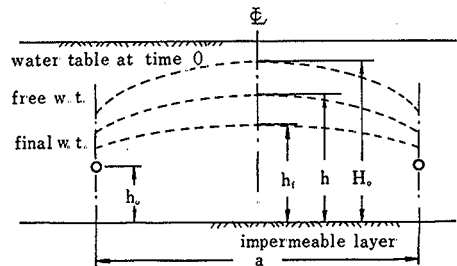


Fig. 8 Geometry and symbols used in discussion of the equation on coefficient of lowering of groundwater table

概要図を Fig. 8 に示し、数式の諸元はつぎのようである。

- L : 暗キヨ間隔, (a).
- T : 時間(日)
- H_o : 暗キヨ間中央における初期地下水位
- h : 暗キヨ間中央における排水後 T 時間の地下水位
- h_f : 暗キヨ間中央における最終地下水位
- k : 透水係数
- \bar{H} : 平均流動深, $\{(h_o + H_o)/2\}$
- h_o : 暗キヨ管内水位, (この場合の H_o , h_o の基準は不透水層)
- m : 重力水の割合

時間 T と実測値から得られる $\log_{10} \frac{h-h_f}{H_o-h_f}$ の値との関係を見ると Fig. 12 のようにほぼ直線を示し、(22)式で表すことができる。(22)式の G はその直線のコウ配であって(20)式のコウ配と同じ値にとれば(23)式が得られる。

$$\log_{10} \frac{h-h_f}{H_o-h_f} = -GT \quad (22)$$

$$k\bar{H}/m = -0.233GL^2 \quad (23)$$

Fig. 12 から

$$G = \left\{ \log_{10} \frac{h_1-h_f}{H_o-h_f} - \log_{10} \frac{h_2-h_f}{H_o-h_f} \right\} (T_1 - T_2)^{-1} \quad (24)$$

実測値から(22)式を使って直線式を求め、これから(24)式を使って G を計算すれば(23)式で $k\bar{H}/m$ が得られる。この $k\bar{H}/m$ を(21)式に代入して L を計算することができる。

III 暗キヨ排水間隔の算定例

暗キヨ排水の間隔を決定する場合に暗キヨの深さおよび土の透水性別に求めるのがおよその値を知る上で便利である。しかし土の透水性すなわち現場透水係数は暗キヨ排水施工の前後で大きく変化する。一般に施工直後は透水性が一時低下するが、その後、年々透水性が増すので暗キヨ間隔の決定においてはどの時点をとるか問題がある。深さについても泥炭地やヘドロ地などでは排水にともなって土が収縮沈下して透水性に変化をもたらす。これらの問題については少なくとも施工後1年の経過を考慮して前に報告⁽¹⁾した現地試験あるいは隣接地や類似地のデータから土の透水性、収縮沈下などの圃場条件を想定して暗キヨの深さおよび土の透水性を求めて間隔を決めなければならない。

暗キヨの深さの違いによるそれぞれの間隔については暗キヨ排水によって地下水が地表から一定の地下水深まで低下するに要する時間を一定として求めるのが今後おこなわれる機械営農の場合の地耐力強化を目的とする暗キヨ排水計画に合致する。⁽⁸⁾したがって土の透水性条件が同一であるとき、ある深さにおいて間隔の正しい値が計算できれば各深さについても正しい間隔を計算によって求めることができる。暗キヨの間隔について一定の施工条件、水理条件にもとづいてつぎの現地試験データから検討を加える。

a. 施工条件はまづ暗キヨ吸水体の深さ H 、暗キヨ吸水体の半径 r 、不透水層の深さ(暗キヨ心からの距離) d を決め、最後に暗キヨ間隔 L を知る。

b. 水理条件は一定と考える。雨量強度 R を求めるために最も近い測候所の気象観測データを使う。また排水によって暗キヨ間中央の地下水位が地表から地表下 20cm 低下に要する時間 T を 1日とする。

c. 土の透水性条件として透水係数 k 、浸出係数 u 、地下水低下係数 $k\bar{H}/m$ は現地データから求める。

以上の条件のうち b の地下水位を暗キヨ間中央における地表下 20cm 低下の所要時間で 1日とおいたのは平均地下水位(後記する 6 項に説明がある)が数日で地表下 50cm 低下するように期待した限界値であってつぎの理由による。

非かんがい期に地下水を低下することによって裏作を可能にし、また水田の作土下に支持力層を作り機械営農に支障のないようにするためである。なお、圃場整備施工 2 年後の茨城県竜ガ崎地区(ローム)において地下水が地表下 50cm を境にしてトラクター(40ps, ホイールタイプ)がスリップ沈下して作業性が極端に低下している。⁽⁹⁾すなわち地下水が地表下 50cm で作業容易、45cm で作業困難、30cm で車輪沈下(27cm)を生じスリップ率 33% を示して作業不能であっ

た。この点について今後、農作業機械の作業体系と土壌条件との間に不都合を見出したときは十分な検討が必要である。
 以上の考え方および条件にしたがって岐阜県高須地区における現地試験データを使い、共通の条件として前節の諸式で暗キヨ排水間隔の算定をおこなう。その結果をまとめたのがTable 9である。

Table 9 Compare the spacing of the underdrainage by calculated values of several equations

10~15times of the depth	TANAKA, SCHROEDER, SLATER	Modifid DELACROIX	TOKSOZ and KIRKHAM	HOOGHOUDT	Seepage coefficient	Modifid GLOVER	Modifid WALKER	Coefficient of lowering of groundwater
10.8m	11.2m	11.9m	11.9m	12.4m	11.2m	12.2m $D=H+d_e$	12.5m $d=0$	11.9m $d=d_e$

conditions : $k=3.6 \times 10^{-6} \text{m/s}$, $H=0.9\text{m}$, $h_p=0$, $h=0.7\text{m}$, $T=\text{one day}$, $d=\infty$, $2r=0.2\text{m}$, Table 10,11

岐阜県高須地区において施工条件としてつぎの値をとった。 $H=0.9\text{m}$, $2r=0.2\text{m}$, $d=\infty$ (諸式のうち無限大がとれないときは条件を明示した)。

水理条件は同地区に最も近い気象データとして今尾観測所記録(明治45年~昭和36年の50年間)から非かんがい期(9~5月)における最大月雨量の確率1/10の値460mmを Table 10, およびこれを対数確率紙(logarithmic stochastic)にまとめた Fig.9から求めた。また、排水によって暗キヨ間中央の地下水水位が地表から地表下20cm低下に要する時間 T を1日とする。

土の透水条件として同地区の昭和39年7月13日, 14日観測による水田の日減水深変化と排水路水位変化から透水係数 k を計算して得た値で $k=3.6 \times 10^{-6} \text{m/s}$ (文献(2)の221~228p.)。また、同地区における各種暗キヨ試験(深さ H , 間隔 L , 吸水材料の違い)の結果 $H=0.9\text{m}$, $L=30\text{m}$, 塩ビ吸水管暗キヨを心にした吸水体外半径 $r=0.1\text{m}$ における昭和40年2月21日~3月8日の観測値を Table 11, Fig.10に示した。Table 11の z , M については後述してある。

Table 10 Calculated table of stochastic maximum month rainfall (IMAO, GIFU prefecture, 1926~1965)

order		corresponding date		order		corresponding date	
1	546.0	1949.9	0.026	21	291.8	1955.10	0.538
2	506.0	1953.9	0.051	22	285.8	1928.9	0.564
3	481.9	1950.9	0.077	23	262.5	1939.3	0.590
4	465.0	1961.9	0.103	24	262.2	1936.4	0.615
5	448.1	1929.9	0.128	25	250.0	1964.9	0.641
6	445.0	1965.9	0.154	26	248.6	1931.10	0.667
7	431.1	1932.9	0.179	27	247.0	1960.5	0.692
8	421.2	1954.9	0.205	28	243.1	1948.9	0.718
9	419.9	1956.9	0.231	29	239.1	1930.10	0.744
10	402.1	1942.9	0.256	30	234.3	1933.4	0.769
11	401.8	1935.9	0.282	31	232.9	1947.9	0.795
12	389.0	1963.5	0.308	32	231.7	1952.4	0.821
13	372.3	1941.9	0.333	33	223.1	1934.5	0.846
14	360.2	1957.9	0.359	34	201.0	1958.4	0.872
15	348.0	1962.4	0.385	35	199.8	1951.4	0.897
16	336.3	1926.5	0.410	36	192.8	1940.10	0.923
17	308.6	1944.4	0.436	37	182.2	1937.11	0.949
18	301.1	1943.9	0.462	38	169.0	1959.5	0.974
19	295.0	1927.9	0.487	39	126.5	1945.5	1.000
20	294.6	1938.5	0.513				

note : fail in datum 1946

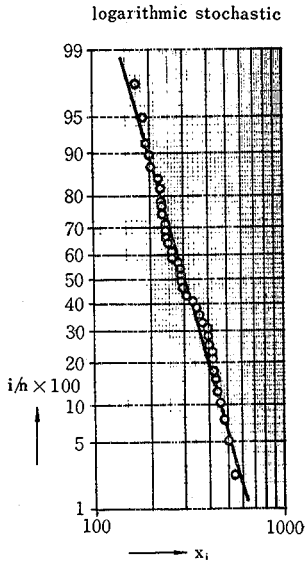


Fig. 9 Stochastic maximum month rainfall

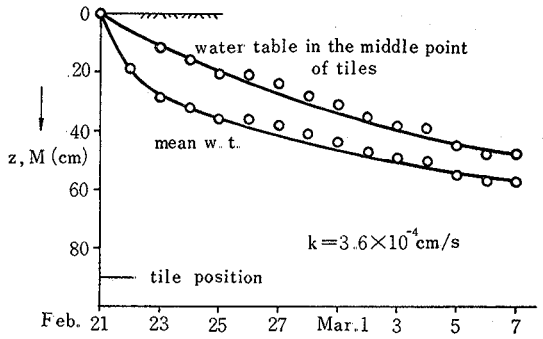
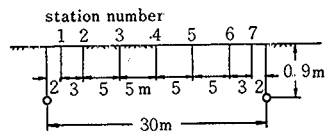
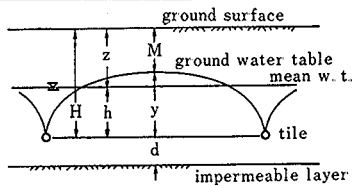


Fig. 10 Relation between time and lowering of groundwater table in underdrainage (TAKASU farm, GIFU prefecture, 1965 Feb. 21 Mar. 8)

Table 11 Measured values of lowering of the groundwater table by underdrainage (TAKASU farm, GIFU prefecture, 1965 Feb. 21 Mar. 8)

date	station number							mean water table, z cm	middle point of typical water table by calculate, Mcm (中央推定値)
	1	2	3	4	5	6	7		
Feb. 21	—	—	—	—	—	—	—	0	0
22	16	25	18	20	18	18	15	19	0
23	35	34	26	29	29	28	25	29	12
24	38	36	30	33	31	31	28	32	16
25	41	40	35	36	35	35	33	36	21
26	42	"	"	34	"	36	34	"	"
27	43	"	37	37	37	37	35	38	24
28	46	45	40	40	38	39	39	41	28
Mar. 1	48	47	43	43	44	43	42	44	31
2	51	49	46	49	"	47	45	47	35
3	53	50	48	48	48	48	47	49	38
4	54	52	40	50	56	49	48	50	39
5	61	55	54	54	54	54	53	55	45
6	60	58	57	57	56	58	56	57	48
7	"	59	58	58	57	54	55	"	"
8	"	58	"	59	"	55	54	"	"



1 深さの10~15倍

透水係数から判断すると粘土質土壌であって約12倍とすれば条件が $H=0.9\text{m}$ であるから $L=10.8\text{m}$ となる。

2 土質による決め方

Table 1 から $H=1.25\text{m}$ のとき粘土と壤土の中間として $L=14\text{m}$, したがって条件が $H=0.9\text{m}$ であるから単純比例計算によって $L=10.1\text{m}$ となる。

Table 2 において粘質壤土で $H=0.8\text{m}$ の平均値 $L=9.5\text{m}$ と $H=1.0\text{m}$ の平均値 $L=10.75\text{m}$ とから $H=0.9\text{m}$ のときは $L=10.1\text{m}$ となる。

Table 3 において $k=3.6 \times 10^{-6}\text{m/s}$ の条件は $1.4 \times 10^{-4} \sim 5.6 \times 10^{-4}\text{cm/s}$ のほぼ中間であるから $H=0.9\text{m}$ のとき $L=13.5\text{m}$ となる。

3 数式による決め方

Modifid DELACROIX's eq. の場合は, $k=3.6 \times 10^{-6}\text{m/s}$, $H=0.9\text{m}$ の条件であるから Fig. 2, 3および(4)式から $\tan \beta=0.047$, $k_1=0.68$, $h_2=0.18$, $n=0.72$ が得られ(3)式で計算する。

$$L = 2 \times 0.72(1.25 - 0.68 - 0.18) / 0.047 = 11.9\text{m}$$

4 TOKSOZ and KIRKHAM の図式解法

計画地区に近い今尾観測所のデータ, Table 10, Fig. 9 から確率1/10最大月雨量の460mmが得られる。この値から単位地下排水量 q を計算し, KIRKHAM の図式解法における雨量強度 R と等しいものとする。

$$q = \frac{x_i \times P \times 10,000 \times 1,000}{D \times 1,000 \times 86,400} = 1.90 \text{ l/s/ha}$$

$$R = q = 1.90 \text{ l/s/ha} = 0.0164\text{m/day} \quad \text{----- (25)}$$

不透水層の深さ無限大の場合は巻末参考資料に示した TOKSOZ & KIRKHAM の図を使う。条件は $H=0.7\text{m}$, $h=\infty$, $k=3.6 \times 10^{-6}\text{m/s}=0.311\text{m/day}$, $2r=0.2\text{m}$ であるから暗キヨ間隔 $2s$ をつぎのようにして求める。

$$k/R = 20.7, \quad 1.364 \times \left(\frac{k}{R} - 1\right) = 26.9, \quad H/r = 7$$

TOKSOZ & KIRKHAM の図から

$$2s/H = 17 \quad \therefore 2s = 11.9\text{m}$$

h が有限で 6m なるときは図から $2s=12.3\text{m}$ を得る。これらの計算のとき, R と k は同一単位, および H , h , r , $2s$ も同一単位をとる。

5 HOOGHOUDT の式による決め方

$k=3.6 \times 10^{-6}\text{m/s}$, $h=0.7\text{m}$, $d=\infty$ の条件で R_0 に(25)式を使えば $R_0=0.0164 \times L/86400=L/5.27 \times 10^6$, $d=\infty$ なので(9)式から $d_0=1.1\text{m}$ である。したがって(8)式を使って L が求められる。

$$L = 8 \times 3.6 \times 10^{-6} \times 0.7 \times 1.1 \times 5.27 \times 10^6 / L + 4 \times 3.6 \times 10^{-6} \times 0.7^2 \times 5.27 \times 10^6 / L$$

$$\therefore L = 12.4\text{m}$$

6 浸出係数による決め方

浸出係数⁽¹⁾や地下水低下係数⁽⁷⁾を知るために地下水変化実測値が必要であって計画地区の実測データ Table 11 が使われる。Table 11 を見て判るように土質の不均一性から暗キヨ間の地下水変化が不規則なので実測値から平均地下水深 z , (各測定値に支配間隔を乗じ, 総計して暗キヨ間隔で除した値) を求めた。なお地下水表面を楕円形と考えて中央水深推定値 M , は $H-y$ であって $h=y\pi/4$ である。Table 11 において21日は欠測であったが 20日に25mmの降雨があって, ほぼ地下水位が地表に一致したものと考えた。

浸出係数を求めるためには SIMPSON の数値積分による図解法と有理関数積分による図解法⁽¹⁾ の2通りあるが, ここでは有理積分による図解法を示した。

条件は $k=3.6 \times 10^{-6}\text{m/s}$, $H=0.9\text{m}$, $h_p=0$, $L=30\text{m}$, $d=\infty$, $2r=0.2\text{m}$ であって, Table 11, Fig. 10 から $T_1=2.3$ 日のとき $h_1=0.6\text{m}$, $T_2=9$ 日のとき $h_2=0.42\text{m}$ である。これを使って h が 0.9m から 0.55m (平均地下水水位であって暗キヨ間中央地下水深 $M=0.2\text{m}$ 低下に相等) に低下するために要する時間 T を1日としたときの L を求

める。なお、 h は前述のように平均地下水位として暗キヨ間中央の地下水位に $\pi/4$ をかけた。

$d = \infty$ であるから

$$V = \ln \frac{r(L^2 + r^2)}{(2h - r)\{L^2 + (2h - r)^2\}}$$

$$\therefore V_1 = -2.40, V_2 = -2.00$$

文献(1)85p. の(19)式を使って(b)を計算する。同式右辺に $b=1$ とおくと

$$(b) = 0.5 \times 3 \times 0.8 \{ (0.21 \times 1.6 \times 0.25 - 0.3^2) (0.3^3 + 1.92 \times 0.0055)^{-1} + (4.69 \times 1.6 \times 0.076 - 0.48^2) (0.48^3 + 1.92 \times 0.045)^{-1} \} - 1 = 0.88$$

同様にして $b=1.5$ とおくと $(b)=1.36$, $b=2$ とおくと $(b)=2.34$ を得る。これらの値から Fig. 11 の図解法で b の値 1.7 が求められる。この $b=1.7$ を文献(1)85 p. の(18)式 (SIMPSON の数値積分のときは前記(11)式) に代入して $a=2.10$ が求められる。

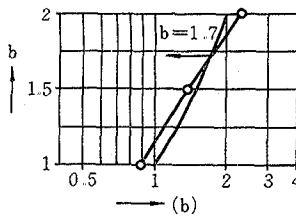


Fig. 11 Relation between condition value "b" and calculated value "(b)" by equation (19) on last report (5)

$$\therefore u = 2.1(1 - hH^{-1})^{1.7} \dots \dots \dots (26)$$

(14)式から

$$a = a_1 \frac{VH_1^{2.5-b}L^{0.5}}{V_1H^{2.5-b}L_1^{0.5}} = -1.352 \times 10^{-2} VL^{0.5} \dots \dots \dots (27)$$

a_1 には(26)式の2.10を代入し、 $V_1 = \ln \frac{0.1(30^2 + 0.1^2)}{1.7(30^2 + 1.7^2)}$, $H = H_1 = 0.9m$, $L_1 = 30m$ を代入した。

(12), (13)式からつぎの数式を得る。ただし、 V の値は H を使い平均値とした。

$$T \doteq -aVL(2\pi k)^{-1}H^{-b} \sum_{i=1}^5 \frac{(H-h)^{b+i}}{(b+i)(H-r)^i} \dots \dots \dots (28)$$

$$\therefore L = 3.04 \times 10^7 \left\{ L^{0.5} V^2 \sum_{i=1}^5 \frac{35^{1.7+i}}{(1.7+i)80^i} \right\}^{-1} \dots \dots \dots (\text{cm単位})$$

この L の式から逐次近似法によって第 1 近似値を適当に決め (例えば $L=10m$)、右辺の L に代入し計算を繰り返して同式を満足する L を求めることができる。

$$\therefore L = 11.2m$$

SIMPSON の数値積分で求めると $b=1.6$ であって $u = 2.01(1 - hH^{-1})^{1.6}$ となり、 $L=11.3m$ を得る。

7 Modifid GLOVER の式による決め方

条件は $k=3.6 \times 10^{-6}m/s$, $H=0.9m$, $h_p=0$, $h=0.7m$, $T=1$ 日, $d=\infty$, $2r=0.2m$, $D=H/2+L$, u は(26)式を使い $2.1(1 - hH^{-1})^{1.7}$ である。

(27)式から $a = -1.352 \times 10^{-2} VL^{0.5}$, (16)式から

$$L = \pi \left\{ -\frac{1.197 \times 10^{-5}}{45+L} L^{0.5} \ln \frac{(L^2+100)}{17(L^2+170^2)} \right\}^{-0.5}$$

同式を満足する L を計算すると $L=44.2m$ が得られる。この値は過大なので D の値に HOOGHOUDT の d_0 を使い $D=H+d_0$ とおくと $L=12.2m$ が得られる。

(15)式から計算するとき L が 11.4m を得るためには $D=H/2+L$ のとき $f=0.57$ を代入しなければならない。

GLOVER の式は D と f の値のとり方によって大きい差が生じるので不安定な式である。

8 Modifid WALKER の式による決め方

条件は前項と同じであるが、 h は平均地下水位をとって55cmとした。また、WALKER の式は $d=0$ であるから a および V はつぎの値をとる。

$$a = 2.1 \frac{V90^{0.8}L^{0.5}}{-2.836 \times 90^{0.8}(3000)^{0.5}}$$

$$V = \ln \frac{r^2(L^2+r^2)^2(4H-r)\{L^2+(4H-r)^2\}}{(2H-r)^2\{L^2+(2H-r)^2\}^2(2H+r)\{L^2+(2H+r)^2\}}$$

$$= \ln \frac{6.374 \times 10^{-3}(L^2+100)^2(L^2+350^2)}{(L^2+170^2)^2(L^2+190^2)}$$

(18)式に代入して整理すると

$$L = \left[-4601.44 \left\{ \ln \frac{6.374 \times 10^{-3}(L^2+100)^2(L^2+350^2)}{(L^2+170^2)^2(L^2+190^2)} \right. \right. \\ \left. \left. \times \int_h^H (1-hH^{-1})^{1.7} \{(L/2)^2+h^2\}^{0.5} h^{-1} dh \right\}^{-1} \right]^2$$

上式の積分項を SIMPSON の数値積分で解き、同式を満足する L を求める。

$$\therefore L = 12.5m$$

(17)式の場合は $h=0.55m$, $f=0.2$ において $L=12.6m$, また $h=0.7m$, $f=0.4$ において $L=12.2m$ を得る。

9 地下水低下係数による決め方

条件は前と同じで $k=3.6 \times 10^{-6}m/s$, $H=0.9m$, $h_p=0$, $L=30m$, $d=\infty$, $2r=0.2m$ であって $H=0.9m$ から $h=0.7m$ に1日で低下させるときの間隔を計算する。ただし $d=\infty$ のときは d_e とおく。

Table 11 の現地試験データから Table 12 を求め、これを図示したのが Fig.12 である。

Table 12 Relation between "T, (day)" and " $(h-h_f)/(H_0-h_f)$, coefficient of lowering of groundwater table" obtained by Table 11

T (day)	(Feb.21) 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$h-d_e$	m 0.90	0.90	0.78	0.74	0.69	0.69	0.66	0.62	0.59	0.55	0.52	0.51	0.45	0.42
$\frac{h-h_f}{H_0-h_f}$	1.00	1.00	0.75	0.67	0.56	0.56	0.50	0.42	0.35	0.27	0.21	0.19	0.06	0.00

notes : $h-d_e = H_0 - d_e - M$
 $H_0 - d_e = 0.9m$, $h_f - d_e = 0.42m$

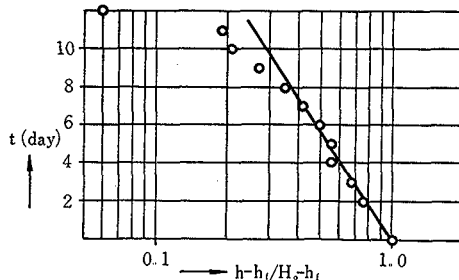


Fig. 12 Relation between coefficient of lowering of groundwater table and its number of days obtained by Table 11

Fig. 12 から $t=T=0$ のとき $\frac{h-h_f}{H_0-h_f} = 1.0$ と $T=10$ 日のとき $\frac{h-h_f}{H_0-h_f} = 0.29$ を知り(24)式から G を求める。

$$G = \frac{\log_{10} 1.0 - \log_{10} 0.29}{0 - 10} = -0.05376$$

(23)式から

$$k\bar{H}/m=0.233 \times 0.05376 \times 30^2 = 11.3 \text{m/day}$$

(21)式から

$$L = \left\{ 4.28 \times 1 \times 11.3 \left(0.108 + \log_{10} \frac{0.9 - 0.42}{0.7 - 0.42} \right)^{-1} \right\}^{0.5} = 11.9 \text{m}$$

IV ま と め

1. 深さの10~15倍, 2. 土質による決め方はともに概略値を知るときに便利な方法である. 3. 数式による決め方は計画地区の透水係数が極端に差のない平均的な値を示す場合に有効な方法である. 4. TOKSOZ and KIRKHAM の図式解法は降雨量の少ない地区に使われる. 降雨強度をうまく見つけだすことを考えるとよい. 5. HOOGHOUDT の式による決め方は簡単な式であるがやや大きい値を示す. 以上は定常状態における決定方法であるが, ある時間内に地下水を排除する非定常状態の決定方法としてつぎの4つの方法を示した.

6. 浸出係数による決め方は著者が誘導したもので計算がやや繁雑であるが, 基準になる既設暗キヨ排水地区の観測データがあれば精度は高い. 7. GLOVER の式, 8. WALKER の式による決め方はともに有効間隙率をそのまま使うことと排水支配層の厚さの設定に問題があり, 基準暗キヨとして両数値を係数化しても良い値が期待できない.

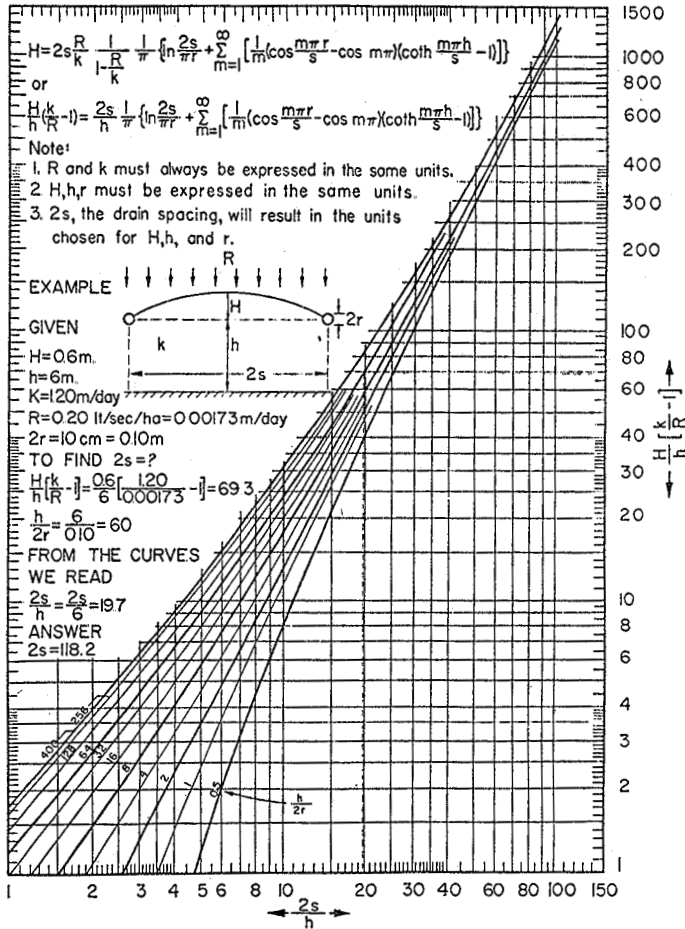
9. 地下水低下係数による決め方は不透水層の深さ(排水支配層の厚さ)も $k\bar{H}/m$ の中に込みになっているので不透水層の深さの違う地区について使用するときには注意が必要である.

以上の各方法の特性を実際に体験したうえで一つの方法にかたよらないことが大切である. 幾つかの方法で比較検討しながら決定するのがよい.

参考資料

1. TOKSOZ & KIRKHAM's drain spacing nomograph, ($h=h$).⁽⁴⁾

GRAPHICAL SOLUTION OF DRAIN SPACING
FORMULA WHEN THE IMPERMEABLE LAYER IS
AT A FINITE DEPTH h BELOW THE DRAIN CENTERS



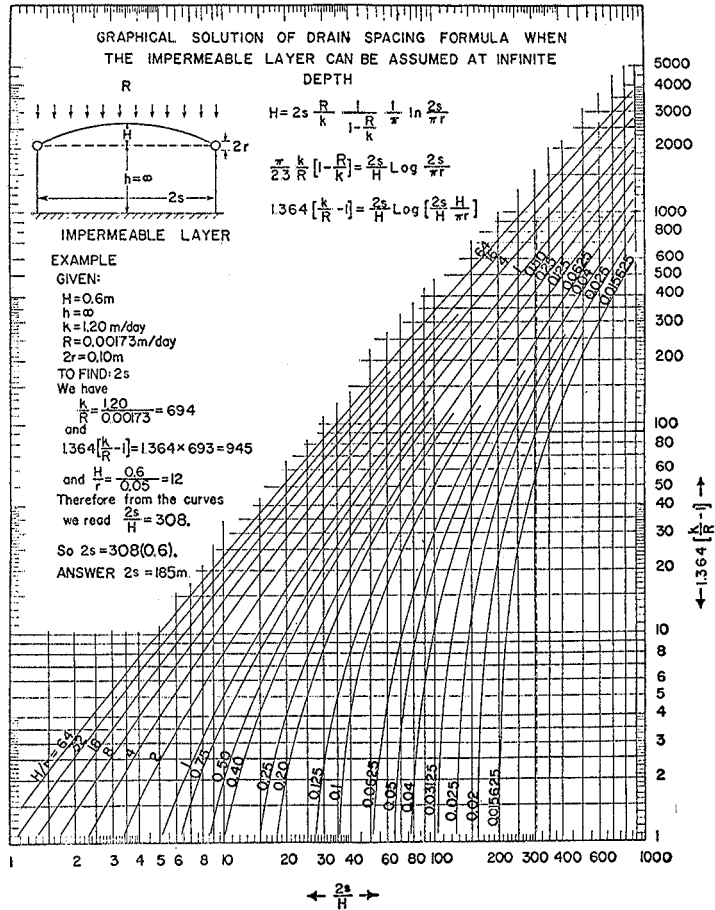
Dimensionless chart of $(H/h(k/R-1))$ vs. $2s/h$ for various values of $h/2r$.

SADIK TOKSOZ AND DON KIRKHAM

Graphical Solution and Interpretation of a New Drain-Spacing Formula
 JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH VOLUME 66, No. 2 FEBRUARY 1961 509~516p.

2. TOKSOZ & KIRKHAM's drains pacing nomograph, ($h = \infty$).⁽⁴⁾

TOKSÖZ AND KIRKHAM



Dimensionless chart of $1.364(k/R-1)$ vs. $2s/H$ for various values of H/r when $h \rightarrow \infty$.

引用文献

- (1) 田地野直哉：香大農学報，30 63，75-94(1978)。
- (2) 農業土木学会：農場整備モデル圃場企画委員会水田部会報告書，第1部 項目別とりまとめ，昭，43. 10 (1968)。
- (3) 北海道開発局農業水産部，札幌開発建設部，北海道農試：41年度計画基準作成調査暗キ ヽ排水調査報告書（高倉地区），昭，42. 3 (1967)。
- (4) TOKSOZ S. and D. KIRKHAM: Graphical solution and interpretation of a new drain-spacing formula, *J. Geophys. Res.*, 66, 509-516, (1961)。
- (5) J. SCHILFGAARDE, Don KIRKHAM and R. K. FREVERT: Iowa state college, *Agr. Exp. Sta. Bull.*, 436 (1956)。
- (6) WILLIAM T. MOODY: *J. Irr. and Drain. Division*, ASCE, IR2, 1-9, (1966)。
- (7) 丸山利輔：農業土木試験場報告，3, 1-43 (1965)。
- (8) 田地野直哉：農業土木学会誌，35(12), 34 (1968)。
- (9) 田地野直哉：金子良編・圃場整備の計画調査 148 (1968)。

(1978年10月16日受理)