

地下水位が浅い地盤への水路からの定常浸透 における浸透流量と自由水面形

RATE OF RECHARGE AND FREE SURFACE IN THE STEADY SEEPAGE
FROM CANAL INTO GROUND WITH SHALLOW WATER LEVEL

宇野 尚 雄*
By Takao Uno

要 旨 水路浸透における浸透流量と自由水面形との関係については、たとえば Kozeny や Dachler の研究があるが、それらは地盤の境界における水位が一定の場合を扱っている。

本研究はそれらに対して、地下水の伏流がある地盤について、水路より上流側のある距離に境界を設定して、その境界の水位を一定に保った場合と、その境界における地下水の伏流流量を一定に保った場合の水路浸透に伴う自由水面形または自由水位の上昇量と浸透流量との関係を検討したものである。本文では、定常浸透状態の自由水面が浸透流量の多少などによって、水路浸透開始前の水面よりどの程度上昇するかという面に主眼点をおいている。研究の結果、水路浸透による自由水面の上昇量は浸透流量にほぼ比例すること、上流側の境界条件として定水位の場合には自由水面の上昇量は水路からの距離に関して指数関数的に減衰するけれども、定流量の場合には自由水面は元水面からほぼ一定の高さだけ上昇することなど興味ある事実を認めた。

1. 概 説

この研究は湖水位低下に伴って予想される湖周辺地下水位の低下を防ぐため、湖岸線沿いに水路を建設して、水路から地盤への浸透水によって地下水かん養をはかることはできないであろうかという問題提起に端を発している。すなわち水路からの浸透水による地下水位の上昇量と浸透流量との関係を把握することが目的である。

実際の地盤は種々の土質で構成されており、地下水の流動はそれらの土質構成と境界条件としての上・下流側の地下水理条件などにより複雑な影響を受けているのであろう。そのような条件をすべて考慮した水路浸透の解析は現在きわめて困難である。本研究では地盤の土質条件として表土層は若干透水性が低いのに対して、下層は比較的透水性の高い、いわゆる2層地盤の土質条件に対する水路浸透実験結果をも若干述べるが、おもに不透水層上の有限深さの均質な透水性地盤を考えている。地下水理境界条件は湖岸付近に建設する水路浸透を考えるの

で、水路から下流側有限距離に一定水位を与えたいうえで、上流側ある距離の境界水位を一定に維持した場合（これを定水位の場合と略称する）と、上流からの地下水伏流が一定流量に維持されている場合（これを定流量の場合と略称する）の2種類である。

さて、この種の水路浸透に関する従来の研究成果を概観すると、浸透する地盤の種類によってつぎの3つに分類される。

- (イ) 無限に深い均質透水層
- (ロ) 不透水層上の有限深さの均質透水層
- (ハ) 薄い低透水表皮層下の厚い高透水性均質層

これらの地盤条件に対して、水理境界条件や水路形状の相違する種々の水路浸透が考えられる。(イ)の場合を対象とした研究者には Kozeny (1931)¹⁾, Seytoux (1964)²⁾ および Vedernikov (1939)³⁾ らがいる。(ロ)の場合を対象としたのは Dachler (1933)⁴⁾ であるが、Bouwer (1965)⁵⁾ は(イ)、(ロ)の両方について研究した。(ハ)の場合を対象として研究したのは Vedernikov⁶⁾, Hamad (1960)⁷⁾ らである。

Kozeny はトロコイド形の水路からの浸透について、地下水流が無限下方で鉛直流となる場合と無限遠・無限下方で水平流となる場合に対して、それぞれ浸透流量と自由水面形を数学的に求めた。Seytoux は地下水位が無限に下方にあるとき、長方形水路からの浸透を写像変換手法で解析し、浸透流量が水路断面積の平方根に比例することや断面積が一定であるならば、深さと幅の比が1対2であるとき流量が最小になることを示した。Vedernikov は地下水位が浅く、水路内の湛水深が0のときの浸透流量を求めた。この場合の自由水面形の式も別に求められている⁸⁾。

Dachler は水路からある距離の境界で定水位を保つ水路浸透の実験結果と仮定された流線網にもとづいて、流れの系を水路近傍の領域と遠方の領域に分けて考え、自由水面形と浸透流量を求める方法を提案した。Bouwer は resistance net work analog を用いて、台形状の水路に対して、地下水位や地盤条件などを種々変えた実験を行ない、その結果を整理して、地下水位の深浅および

* 正会員 工修 岐阜大学講師 工学部土木工学科

水路幅に対する透水性地層厚の比をパラメーターとした水路浸透流量を求める図表を提示した。(ハ)の場合に対しては、Vedernikov は地下水位が浅い場合と無限下方にある場合について水路浸透流量を求め、Hammad は地下水位が無限に深いとき、等間隔、平行に配置された水路からの浸透流を数学的に求めている。

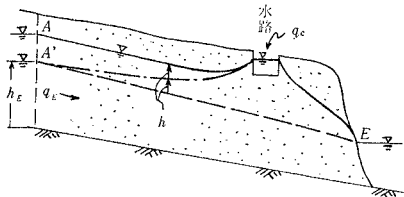
上述のように従来の研究では、地下水位が浅い場合でも地下水理境界条件としての水位は定水位の場合のみである。本研究では上流から地下水の伏流がある地盤で、水路下流ある距離の湖岸などで定水位とした流れ系を考えている。上流からの地下水の伏流という条件の解析への導入は困難なため、数種の基本的流れ系を考える。そして基本的流れ系を写像変換による解法で解析し、実際の流れ系をそれらの組み合わせによって表現することを試みた。その結果を吟味するため、室内の水槽内に形づくった砂模型によって水路浸透実験を行ない、若干の考察を加えた。

2. 水路から地盤への定常浸透流の解析

(1) 流れ系の選定

現象は湖岸近くに設けられた水路からの浸透であって、有限深さにある不透水層上の透水性均質地盤に対して、上流側から伏流水があって、水路より下流の境界としての湖面は定水位に保たれている場合である。図-1

図-1 水路から地盤への浸透系



はその流れ系を示す。上流から流量 q_E の地下水伏流のみによる自由水面形は $A'E$ であるが、流量 q_c の水路浸透がある場合には自由水面は h (上流側境界条件の違いによりその量は異なる) だけ上昇する。境界条件は一定の下流湖水位、上流側の一定水位 h_E (「定水位の場合」) であって、上流側水面は点 A' に保たれている) または一定の伏流流量 q_E (「定流量の場合」), 水路からの浸透流量 q_c , さらに水路形状や地盤内の不透水面の位置などである。

このような流れ系は定常浸透流であるので、数学的には Laplace の方程式を上述の境界条件を満足するように解けばよい。しかしこの境界値問題は容易に解けない。そこで、図-1 に示す浸透流を直接解くかわりに、図-2 (a), 図-3 (a) および 図-4 (a) に示される基本的な流れ系を考え、しかるのちにそれらを組み合わせることとする。本文では 図-2 (a) の流れ系を流れ系 I, 図-3 (a) のを流れ系 II, 図-4 (a) のを流れ系 III と仮称する。

流れ系 I は半無限均質透水性地盤の表層につくられた水路から水平距離 l の地点で水路底面から落差 H_w のところにある水平な定水位の地下水面をもつ地盤への対称な水路浸透である。水路 DE からの浸透流量 q_{c1} がある

図-2 水路浸透, 流れ系 I

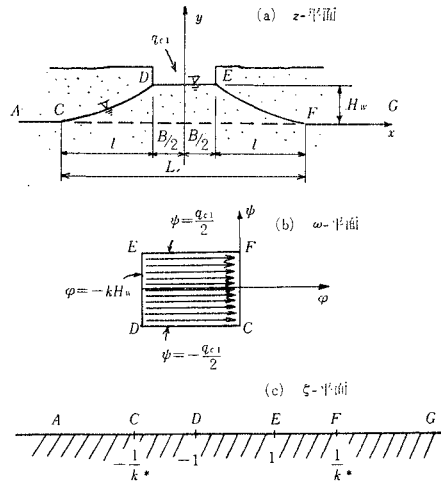


図-3 水路浸透, 流れ系 II

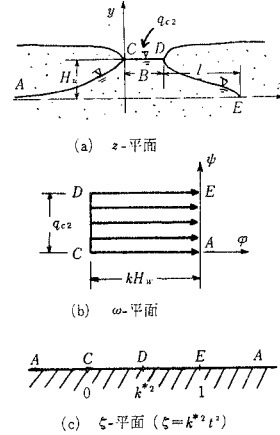
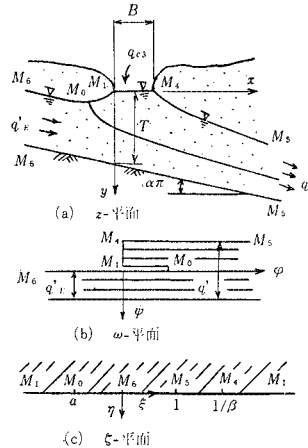


図-4 水路浸透, 流れ系 III



とき、その流量が水路に溜まることのない状態、すなわち水路水位が水路底面にある状態における水路浸透である。流れ系Ⅱは流れ系Ⅰの一方の境界までの距離 l を無限遠方にした系であって、これらは「定水位の場合」である。流れ系Ⅲは傾斜した、有限厚さの透水性地盤で、上流側無限遠から定流量 q_{c1} の伏流水があるところへ水路から流量 q_{c3} の浸透水がある場合である。

(2) 流れ系Ⅰの解析⁹⁾

図-2 (a) の流れ系を複素ポテンシャル平面、すなわち ω -平面 ($\omega = \varphi + i\psi$, φ : ポテンシャル, ψ : 流れ関数) で表わすと、図-2 (b) のような長方形領域内の平行流であって、これを Schwarz-Christoffel の公式により 図-2 (c) の ζ -半平面に変換する。

$$\omega = \frac{q_{c1}}{2K} i \int_0^{\zeta} \frac{d\zeta}{\sqrt{(1-\zeta^2)(1-k^{*2}\zeta^2)}} - kH_W \dots (1)$$

ここに、 K は母数 k^* の第1種完全だ円積分、 k は地盤の透水係数である。

点 F における条件: $\varphi=0$, $\psi=q_{c1}/2$, $\zeta=1/k^*$ を用いると

$$q_{c1} = 2kH_W \frac{K}{K'} \dots (2)$$

ここに、 K' は補母数 $k^{*'}$ の第1種完全だ円積分である。一方、Zhoukovsky の関数

$$\begin{cases} \theta = \theta_1 + i\theta_2 = \omega - ikz, & z = x + iy \dots (3) \\ \theta_1 = \varphi + ky, & \theta_2 = \psi - kx \end{cases}$$

を導入すると、

$$\theta = \omega - ikz = \frac{i}{2} (q_{c1} - kB)\zeta \dots (4)$$

が得られ、式(4)に点 F の条件を代入することによって、式(2)で与えられる流量 q_{c1} の満足すべき条件を得る。

$$\frac{q_{c1}}{kH_W} = 2 \cdot \frac{K}{K'} = \left\{ \frac{B}{H_W} - k^* \cdot \frac{L}{H_W} \right\} \cdot \frac{1}{1-k^*} \dots (5)$$

ここに、 $L = B + 2l$

さて、式(4)はつぎのように書きなおされる。

$$\zeta = \frac{1-k^*}{k^*} \cdot \left\{ \frac{z}{l} + \frac{\omega}{kl} i \right\} \dots (6)$$

式(1)も第1種だ円関数の逆関数である Jacobi のだ円関数を用いてつぎのように書ける。

図-5 (a) 第1種完全だ円積分の比 K/K' と母数との関係

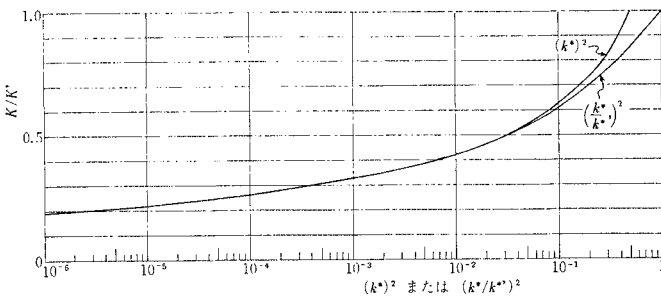
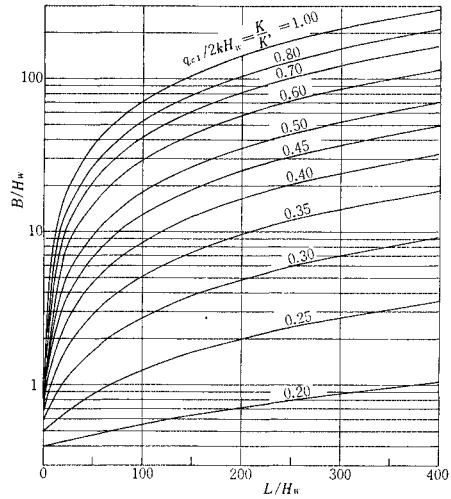


図-5 (b) B/H_W , L/H_W と $q_{c1}/2kH_W$ との関係 (式(5))



$$\zeta = -\operatorname{sn} \left\{ K' \left(\frac{\omega}{kH_W} + 1 \right) i, k^* \right\} = \frac{-1}{k^* \cdot \operatorname{sn} \left(\frac{K'\omega}{kH_W} i, k^* \right)} \dots (7)$$

式(6)と式(7)を等置することにより、 z -平面と ω -平面との間の関係式を得る。

$$\frac{z}{l} = -\frac{\omega i}{kl} - \frac{1}{1-k^*} \cdot \frac{1}{\operatorname{sn} \left(\frac{K'\omega}{kH_W} i, k^* \right)} \dots (8)$$

したがって自由水面形 EF は条件: $\varphi + ky = 0$, $\psi = q_{c1}/2 = kH_W K/K'$ を式(8)に代入することにより得られる。

$$\frac{z}{l} = \frac{KH_W}{K'l} + \frac{y}{l} i + \frac{\operatorname{dn}(K'y/H_W, k^{*'})}{1-k^*} \dots (9)$$

または

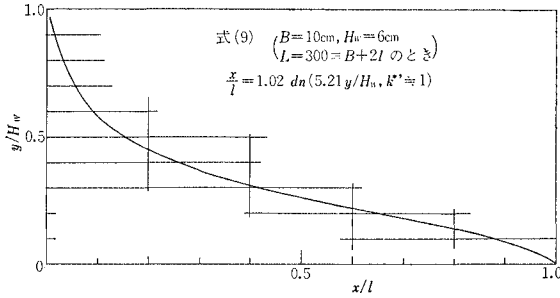
$$\frac{x}{l} = \frac{KH_W}{K'l} + \frac{\operatorname{dn}(K'y/H_W, k^{*'})}{1-k^*} \dots (9')$$

以上この項では、流れ系Ⅰの水路浸透における流量は式(5)で、自由水面形は式(9)でそれぞれ与えられることを示した。式(5)に現われる第1種完全だ円積分 K , K' と母数 k^* , $k^{*'}$ との関係を 図-5 (a) に示した。また式(5)の関係は 図-5 (b) に図示した。これらの図を用いると、与えられた水路幅 B , 水位落差 H_W , 距離 l により q_{c1}/k の値が容易に求められる。式(9')にもとづいて計算した自由水面形の一例を 図-6 に示した。図-6 から、水路近傍における自由水面の傾斜はかなり急であることが認められる。

(3) 流れ系Ⅱの解析⁹⁾

図-3 (a) に示された流れ系Ⅱの解析も前項と同様の方法によって行なうことができる。均質地盤の透水係数 k の一様性と水路内の湛水深が零という仮定をする。

図-6 流れ系 I の自由水面形の一計算例



条件:

$$\overline{CD}: \varphi = -kH_w, \overline{CA}: \varphi + ky = 0, \psi = 0$$

$$\overline{DE}: \varphi + ky = 0, \psi = q_{c2}$$

を用いて、図-3(a) の実際の流れ領域を 図-3(b) の ω -平面上の長方形領域に表わして、これを 図-3(c) の ζ -半平面に次式で写像変換する。

$$\omega = \frac{q_{c2}}{K} \cdot i \int_0^t \frac{dt}{\sqrt{(1-t^2)(1-k^{*2}t^2)}} - kH_w \dots(10)$$

ここに、 $\zeta = k^{*2}t^2$

点 E の条件を式 (10) に代入すると、流量 q_{c2} は

$$q_{c2} = kH_w \cdot \frac{K}{K'} \dots\dots\dots(11)$$

流れ系 II に対する Zhoukovsky の関数は

$$\theta = \omega - ikz = \frac{q_{c2} - kB}{k^{*2}} \zeta \cdot i = (q_{c2} - kB)t^2 \cdot i \dots(12)$$

と表わすことができるので、次式が得られる。

$$\frac{q_{c2}}{kH_w} = \frac{B}{H_w} - \left(\frac{k^*}{k^{*'}}\right)^2 \cdot \frac{l}{H_w} = \frac{K}{K'} \dots\dots\dots(13)$$

式 (10) を Jacobi のだ円関数で表わした関係

$$t = \text{sn} \left\{ \frac{K}{q_{c2}i} (\omega + kH_w), k^* \right\} \dots\dots\dots(14)$$

を式 (12) に代入することにより、 z -平面と ω -平面との間につきの関係式が成立する。

$$\frac{z}{l} = -\frac{\omega}{kl} i + \left(\frac{k^*}{k^{*'}}\right)^2 \cdot \text{sn}^2 \left\{ K'i \left(\frac{\omega}{kH_w} + 1 \right), k^* \right\} \dots\dots\dots(15)$$

一方、

$$\text{sn} \left(K' \frac{\omega}{kH_w} i + K'i, k^* \right) = \frac{1}{k^* \cdot \text{sn} \left\{ -\frac{K'\psi}{kH_w} + \frac{K'\varphi}{kH_w} i, k^* \right\}}$$

なる関係に自由水面 \overline{AC} の条件: $\varphi = -ky, \psi = 0$ を代入すると、

$$\text{sn} \left\{ \frac{K'\omega}{kH_w} i + K'i, k^* \right\} = \frac{-i}{k^*} \cdot \frac{\text{cn} \left(\frac{K'y}{H_w}, k^{*'} \right)}{\text{sn} \left(\frac{K'y}{H_w}, k^{*'} \right)} \dots\dots\dots(16)$$

式 (16) を式 (15) に代入して、自由水面 \overline{AC} の方程式を得る。

$$\frac{z}{l} + \frac{\omega}{kl} i = -\left(\frac{1}{k^{*'}}\right)^2 \left\{ \frac{1}{\text{sn}^2(K'y/H_w, k^{*'})} - 1 \right\} \dots\dots\dots(17)$$

すなわち

$$\frac{x}{l} = -\left(\frac{1}{k^{*'}}\right)^2 \left\{ \frac{1}{\text{sn}^2(K'y/H_w, k^{*'})} - 1 \right\} \dots\dots(17')$$

自由水面 \overline{DE} に対しては、 $\varphi = -ky, \psi = q_{c2}$ として、

$$\text{sn} \left\{ \frac{K'\omega}{kH_w} i + K'i, k^* \right\} = -\frac{1}{k^*} \cdot \text{dn} \left\{ \frac{K'y}{H_w}, k^{*'} \right\}$$

であるから、式 (15) より自由水面の方程式を得る。

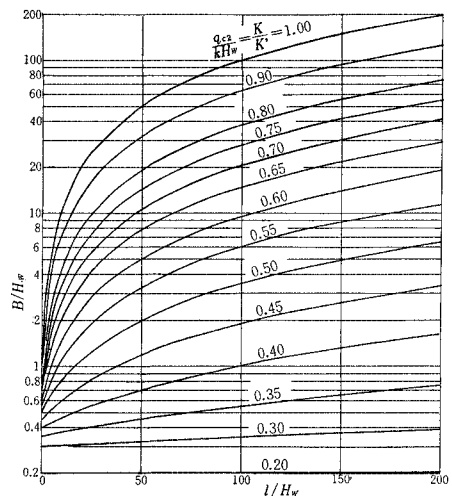
$$\frac{z}{l} + \frac{\omega}{kl} i = \left(\frac{1}{k^{*'}}\right)^2 \cdot \text{dn}^2 \left\{ \frac{K'y}{H_w}, k^{*'} \right\} \dots\dots\dots(18)$$

すなわち

$$\frac{x}{l} = \frac{KH_w}{K'l} + \left(\frac{1}{k^{*'}}\right)^2 \cdot \text{dn}^2 \left\{ \frac{K'y}{H_w}, k^{*'} \right\} \dots\dots\dots(18')$$

上述のことから、流れ系 II に対する浸透流量 q_{c2} は式 (13) で与えられ、自由水面形は式 (17) および式 (18) で与えられることがわかる。式 (13) を図示したものが 図-7 である。なお、式 (2) の K/K' の値は式 (5) で規定され、式 (11) の K/K' の値は式 (13) で規定されるので、それぞれ K/K' の値は異なるから、 $q_{c1} = 2q_{c2}$ とは必ずしもいえない。式 (17) と式 (18) による自由水面形の計算例を示すと 図-8 のようである。

図-7 $B/H_w, l/H_w$ と q_{c2}/kH_w の関係 (式 (13))

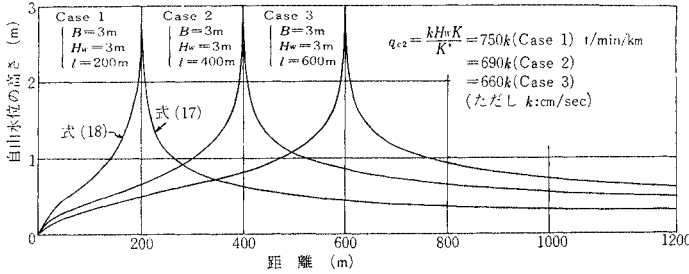


(4) 流れ系 III の解析

図-4(a) に示される流れ系 III が前述の 2 つの流れ系と異なる点は透水性地盤の深さが有限であること、地盤が傾斜していることおよび水路より上下流両端における条件として、一定の流量 (q_E と $q_E + q_{c2}$) だけを規定していることである。この流れ系の解析は P-Kochina⁹⁾ によって説明されている。その結果を要約するとつぎのようである。

図-4(b) の ω -平面は次式により、図-4(c) の ζ -半平面に写像変換される。

図-8 流れ系 II の自由水面形 (式 (17) と式 (18) の 3 個の計算例)



$$\omega = iq_E - \frac{2q_E}{\pi} \cosh^{-1} \frac{1}{\sqrt{\beta\zeta}} + \frac{2q'}{\pi} \sinh^{-1} \sqrt{\frac{1-\beta}{\beta(1-\zeta)}} \dots\dots\dots(19)$$

ただし,

$$q' = q_E + q_{c3}, \sinh^{-1} x = \ln(x + \sqrt{x^2 + 1}), \cosh^{-1} x = \ln(x + \sqrt{x^2 - 1})$$

β はのちに決定されるべきパラメーター

図-4 (a) の点 M_0 は上流からの自由水面でもある流線と水路からの流線とが出会う点で、この流れ系の特性を表わす点で、点 M_0 の ζ -半平面上の座標は

$$\zeta = a = 1 / \left\{ 1 - \frac{q'}{q_E} \cdot \sqrt{1-\beta} \right\} \dots\dots\dots(20)$$

で与えられ、自由水面の条件 $\varphi - ky = 0$ を用いると、点 M_0 の座標 y_0 は

$$y_0 = \text{Real part of } \left\{ \frac{\omega(a)}{k} \right\} \dots\dots\dots(21)$$

一方、Zhoukovsky の関数

$$\theta = \theta_1 + i\theta_2 = z - i\omega/k, \theta_1 = \frac{\psi}{k} + x, \theta_2 = \frac{\varphi}{k} - y \dots\dots\dots(22)$$

を導入し、区間 $(0 < \zeta < 1)$ の境界条件と Cauchy の公式を用いて、つぎの $z \sim \omega \sim \zeta$ の関係を求めている。

$$z(\zeta) = T \cot g \alpha \pi + \frac{q_E}{k} + i \frac{\omega}{k} - \frac{\cos \alpha \pi}{\pi} \cdot \zeta^\alpha (\zeta - 1)^{1-\alpha} \int_0^1 \frac{t^{-\alpha} (1-t)^{\alpha-1} \cdot \varphi(t)}{t-\zeta} dt \dots\dots\dots(23)$$

式 (23) の $\alpha \pi$ は地盤の不透水面の傾斜であるが、いま $\alpha \pi$ が小さく緩傾斜の場合には $\tan \alpha \pi \approx \alpha \pi$ であって、そのときパラメーター β は次式で与えられる。

$$\beta = 1 - \exp(-2\varepsilon), \varepsilon = \frac{\pi}{2T} (B - q_{c3}/k) \dots\dots\dots(24)$$

上述の解析は水路から水が浸透している場合で、このためにはつぎの関係が必要である。

$$a = 1 / \left\{ 1 - \frac{q'}{q_E} \cdot \sqrt{1-\beta} \right\} < 0, \text{ i.e., } \frac{q_E}{q'} < e^{-\varepsilon} \dots\dots\dots(25)$$

流れ系 III においては水路の上下流の境界を有限距離に設定していないので、浸透流量を地盤の幾何的条件によって決定することができない。そこでこの問題は次項

(5) で考察する。ここでは流れ系 III に対する上述の解析結果を若干考察しておく。

水路からの浸透水によって自由水面は上昇して、座標 y_0 で示される点 M_0 の高さになる (図-4 参照)。その y_0 の値と水路浸透流量 q_{c3} や伏流流量 q_E との関係は式 (20)、式 (21) および式 (24) から求めた計算例について述べる。計算結果の一例は図-9 のようである。これは $\beta = 0.45$ の場合の $y_0 = \omega(a)/k$ と q'/k との関係であって、

右あがりの曲線群は q_{c3} を一定にして q_E' を増加させたときの関係、右さがりの曲線群は q_E' を一定に保って q_{c3} を増加させたときの関係を示している。いま、 $\beta = 0.45$ であるから、式 (24) によると $(B - q_{c3}/k)/T$ の値が一定の場合に相当する。そのため q_{c3} が増加することは水路幅 B も増加させていることを含んでいる。いずれにせよ、伏流流量 q_E' を一定に保ちながら水路浸透流量 q_{c3} を増加させると、水路内水位から上流側の最低自由水位までの落差 y_0 は増加すること、逆に q_{c3} を一定に保ちながら q_E' を増加させると y_0 は減少することが図-9 から認められる。伏流流量 q_E' がさらに増加すると式 (25) の関係が満足されなくなって、伏流水が水路に浸出することになる。

図-9 変換された流量 ($q'/k, q_{c3}/k$ など) と y_0 の関係

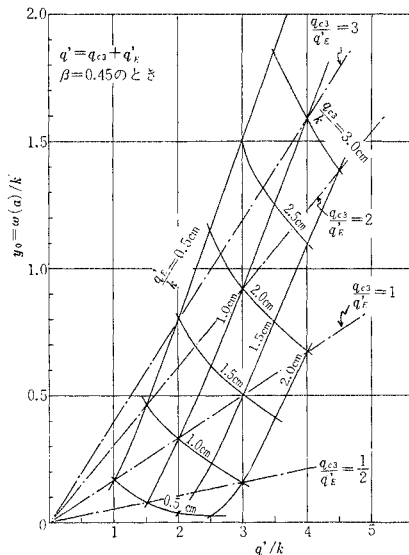
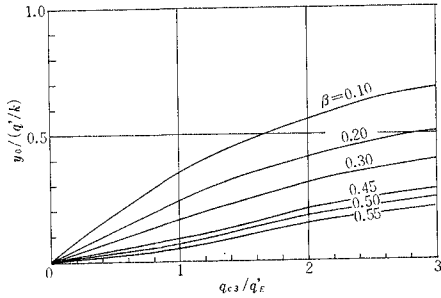


図-9 において、 q_{c3}/q_E' の比を一定に保ちながら、 y_0 と q'/k の関係を見ると、この両者はほぼ正比例の関係にあることが認められる。図-9 には一点鎖線でそれを示した。そこで $y_0/(q'/k)$ と q_{c3}/q_E' との関係を β をパラメーターにして描くと 図-10 のようである。 β の値が小さくなると、 $y_0/(q'/k)$ の値は極端に大きくなる傾向がある。

図-10 $q_{c3}/q_{E'}$ と $y_0/(q'/k)$ との関係



(5) 実際の流れ系の考察

湖岸近傍に設けた水路からの浸透は現実には種々の問題があるが、近似的には図-1のような流れ系を考慮することができる。この流れ系は流れ系II(図-3(a))の非対称な半無限地盤への水路浸透と流れ系III(図-4(a))の地下伏流水のある有限透水性地盤への水路浸透とが複合したものと考えられる。流れ系IIの水路浸透流量 q_{c2} は式(13)により与えられ、地盤の透水係数 k 、水路から元地下水位までの落差 H_W 、水路幅 B および水路からの有限距離 l によりきまる。一方、流れ系IIIの水路浸透流量は流れ系が無限領域にあるため、幾何的条件によって決めることができない。

しかし流れ系IIIの水路浸透流量 q_{c3} も、実際の流れ系の水路浸透流量 q_c も、図-1や図-4(a)に示されるように、水路から上流側へはある有限距離の範囲しか流れず、おもに右側下流へ向かうことおよび両者とも有限深さの透水層地盤に対応していることを考慮して、両者は近似的に等しいとする。すなわち

$$q_c \doteq q_{c3}$$

一方、流量 q_{c2} は半無限透水性地盤への浸透流量であることを考慮すると、 $q_{c2} > q_{c3}$ と考えられるので

$$q_{c3} = \kappa q_{c2}, \quad 0 < \kappa < 1 \quad \dots\dots\dots(26)$$

として、流量の低減係数 κ を導入して考えることとする。この低減係数 κ は後述の実験から決定されるであろう(式(29)参照)。

3. 水路浸透の室内実験結果とその考察

(1) 実験装置および方法

室内実験は図-1に示される一般的な流れ系に対して、水平に置かれた鋼製水槽(写真-1)内で実施するため、図-11(a)に示したような不透水面が水平な流れ系について行なった。鋼製水槽は高さ50cm、長さ400cm、幅25cmであって、前面300cmはガラス張りになっている。その中に高さ40cm、長さ315cm、幅23cmの長方形砂模型をつかって、これを地盤とみなした。この砂模型の表面に金網でつくった水路は砂模型左端からの距離 l_L (右端からの距離を l_R とすると、 $l_L + l_R = 315$ cm) のところにつくられ、 $l_L = 167.5$ cm の水路位置 (Posi-

写真-1 実験水槽

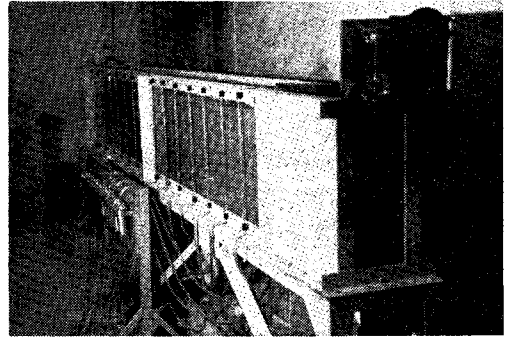


図-11(a) 実験砂模型の流れ系

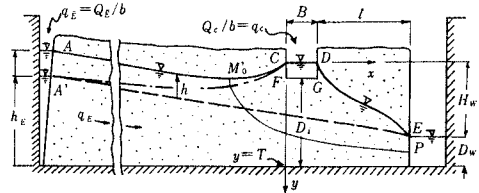
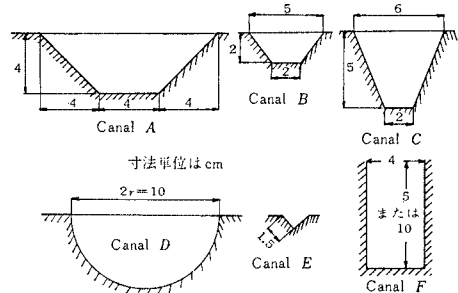


図-11(b) 実験水路の種類



tion I), $l_L = 217.5$ cm の水路位置 (Position II) および $l_L = 277.5$ cm の水路位置 (Position III) の3種類について実験された。

用いた砂は均等係数 1.78、乾燥密度 1.56 g/cm^3 、間げき比 0.69、10% 粒径 0.13 mm、透水係数 $2.38 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ (定水位透水試験による測定値) の豊浦標準砂である。実験に用いた水路は100番の金網でつくり、その規模・形状は図-11(b)に示す6種類である。

図-11(a)に示されている流れ系では、上流端水位 h_E のところから伏流水に相当する流量 Q_E が流下して、右端の水深 D_W の貯水池へ流れ込む。そのときの自由水面形が $A'E$ である。水槽底面から D_i の高さに水路をつくり、水路から流量 Q_c を注水する。水路水位は下流貯水位面から H_W の高さで平衡して、水路からの浸透水により水路近傍の自由水面の上昇量 h が生じる。後述するように、この上昇量 h は上流側の水理境界条件により影響される。本研究では、上流側水位 h_E を一定に保つ場合(「定水位の場合」)および水位ではなく伏流流量 Q_E を一定に保つ場合(「定流量の場合」)の2種類について実験した。

上述のことから、本実験は水路の位置、水路の種類、右端貯水池水深 D_W 、水路下面下の透水層厚 D_i 、伏流流量 Q_E 、水路浸透流量 Q_c および上流境界条件の組み合わせにより種々の場合が考えられる。本研究で実施した実験の数はかなりの量になるが、本文中にそのデータを使用したもののみを掲げると、「定水位の場合」は表-1、「定流量の場合」は表-2 のようである。

時間的に一定の流量 Q_E, Q_c は水道水を枝つきビュレットを通して調節し、実験前と実験終了後にメスシリンダーにうけて測定した。自由水面の高さはおもに水槽の

表-1 実験の種類 (定水位の場合)

地盤の種類	水路位置	水路の種類	D_i (cm)	D_W (cm)	元地下水面こう配1
均質地盤	I	A	36	34	0
	I	A	36	31	0
	I	A	36	28	0
	I	D	35	37	0
	I	D	35	34	0
	I	D	35	28	0
	I	E	38.9	34	0
地盤	II	A	36	34	0
	III	A	36	34	0
	III	A	36	34	0.001
	III	A	36	34	0.002
	III	B	38	34	0
2層地盤	III	C	35	34	0
	III	B	38	35	0
	III	B	38	30	0
	III	C	38	30	0

表-2 実験の種類 (定流量の場合)

D_i (cm)	D_W (cm)	伏流流量 Q_E (cm ³ /min)
0	10	18.5
0	20	22.7
10	5	23
10	5	30
10	5	60
10	10	30
10	10	60
20	10	60±2
20	15	30±2
20	15	50
20	15	60
20	20	60
30	20	59

注：すべて「均質地盤」, 「Position III」, Canal F ($B=4$ cm) の場合

図-12 水路浸透による自由水面の上昇量と水路からの距離の関係 (定水位の場合)

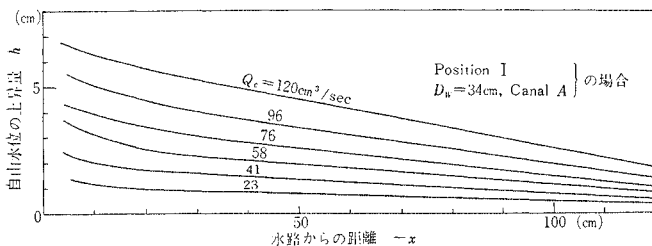
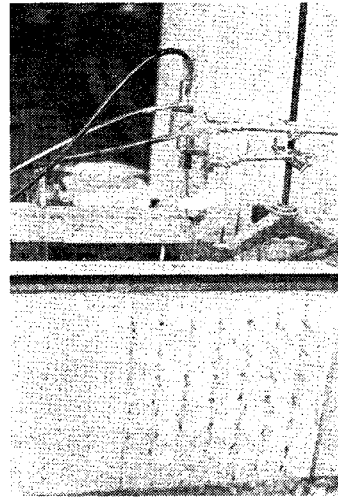


写真-2 水路近傍の水頭測定



下面 20 cm おきの点での水頭をピエゾメーターによる測定から推定した。しかし水路周辺の浸透水流は複雑なため、補助的に水路近傍 35 cm の範囲で 5 cm 間隔の格子点位置に水槽の背面から穴をあけ、ピエゾメーターによる測定値をもとに補正した(写真-2 参照)。

なお、後述する「2層地盤」に対する水路浸透実験においては、さきに述べた高さ 40 cm の砂模型の表層 5 cm の部分を透水係数 $k=3.30 \times 10^{-4}$ cm/sec のシルト質土におきかえている。

(2) 「定水位の場合」の実験結果

a) 水路浸透による水位上昇量 h について

水路断面形が台形状の Canal A の場合で、 $h_E = D_W = 34$ cm, すなわち元自由水面は水平のとき、水路浸透による自由水面の上昇量 h は水路からの距離 $-x$ において、図-12 のようである。図-12 のパラメーターは一定の水路浸透流量 Q_c で、水槽の奥行き 23 cm を b とし、 $Q_c = bq_c$ である。自由水面の上昇量 h は水路浸透流量 Q_c の増加とともに増加することおよび上昇量 h は水路からの距離 $-x$ の増加に対して指数関数的に減少することが明らかである。

図-12 の関係を h と Q_c との関係にして描きなおすと、距離 $-x$ をパラメーターにした図-13 が得られる。

図-13 から水位上昇量 h は流量 Q_c にほぼ正比例することがわかる。このことは解析の項 2.(2) における式 (2) や 2.(3) における式 (13) にみられるように、水路浸透流量が水路内水位と境界水位との落差 H_W の一次式として表わされているようにみえる(このことは、たとえば式 (2) の K/K' の値が式 (5) によって H_W の関数であるので、厳密には誤りである) ことと関連して興味深い。

図-13 の $h \sim Q_c$ の関係を kh/q_c と $-x$

図-13 水路浸透流量と自由水位上昇量との関係 (定水位の場合)

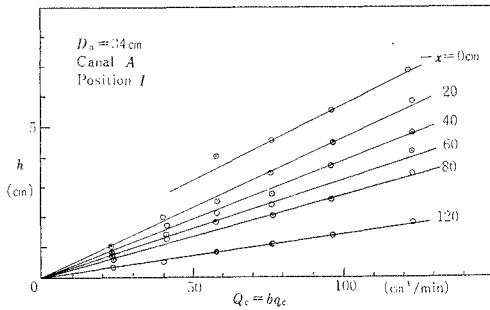
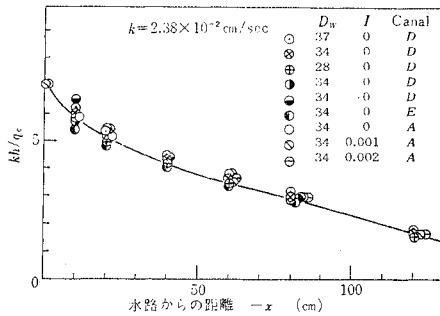


図-14 水路浸透流量に対する自由水位上昇量の比と水路からの距離との関係 (定水位の場合)



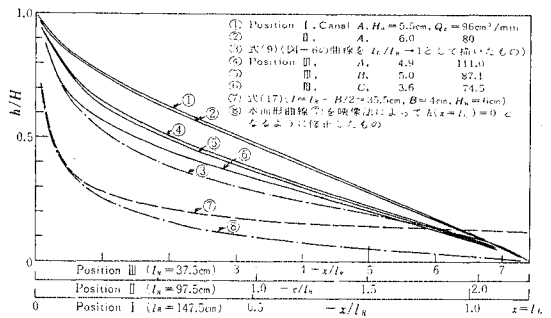
との関係に再整理すると 図-14 が得られる。図-14 には水路断面形状が Canal A, Canal D, Canal E などの場合、外水位が水槽底面から高さ $D_W=37$ cm, 34 cm, 28 cm にある場合および $h_E > D_W$ という元自由水面が傾斜している場合 (図-14 の I は元自由水面の傾斜で、 $I=(h_E - D_W) \div 315$ cm) の実験結果も示されている。なお 図-12, 13, 14 に示した実験の水路位置は Position I の場合である。図-14 から kh/qc の値は水路規模の大小、断面形状および元自由水面こう配の影響を大して受けないことが認められる。しかし細かくみると、水路近傍では kh/qc の値はわずかながらバラツキしており、影響が現われているようである。本実験に用いた種類の水路規模の範囲では、その関係が明確に現われなかった。

水路位置における水位上昇量 H に対する水路側面からの距離 $-x$ における水位上昇量 h の比 h/H と距離 $-x$ との関係は 図-15 のようになる。図-15 には水路位置が Position I, II, III の 3 つの場合が掲げられている。それら 3 つの各場合の横座標の l_R の値は異なっていて、順に $l_R=147.5$ cm, 97.5 cm, 37.5 cm となっているが、図-15 では l_L/l_R の値が等しくなるように縮尺をとって描かれている。Position I の h/H と $-x/l_R$ ($-x$ は水路側面から左側上流への距離) の関係は 図-14 に示された程度のバラツキは認められた。また Position II の場合の h/H と $-x/l_R$ の関係もほぼ同様であった。しかし水路位置が極度に砂模型の端へ近くなって、Position III の位置になると、浸透流量 Q_c の多少により

h/H の値も増減する傾向がみられるが、全体的に h/H の値は小さくなっている。このことは境界の近い方に向う浸透水流が多くなることに起因していると考えられる。

式 (9') を $B=10$ cm, $H_W=6$ cm, $L=300$ cm の場合 (Position I に類似する場合) および、式 (17') を $B=4$ cm, $H_W=6$ cm, $l=37.5$ cm の場合に計算した結果がそれぞれ 図-15 に記されている。明らかに、水路位置の水位上昇に対する水路より上流側の自由水位の上昇の割合 h/H は実験値の方が理論値より大きくなっている。たとえば Position III の場合には実験値は計算値の 2~3 倍近くになっている。これが何に起因するものかわからないが、(i) 理論式 (9') や式 (18') が半無限透水性地盤の場合 ($D_i \rightarrow \infty$) に対応しているのに対して、実験値が有限深さの透水性地盤の場合 ($D_i = \text{有限}$) であること、(ii) 理論値に考慮されていない砂模型内の毛管帯の存在、(iii) 理論では水路内湛水深が 0 であるのに対して、実験では台形状などの水路断面内に数センチメートルの湛水深があること、などが原因と考えられる。

図-15 種々の場合の水路浸透による自由水面形 (定水位の場合)



b) 「2層地盤系」に対する実験結果について

前項には均質な砂模型に対する実験結果について述べた。ここでは豊浦標準砂からなる砂模型の高さ 40 cm のうち表層の 5 cm をシルト質土におきかえた「2層地盤系」のものに対する水路浸透実験で、「定水位の場合」に対して実施した結果について述べる。シルト質土の透水係数は 3.30×10^{-4} cm/sec であって、下部の透水係数 2.38×10^{-2} cm/sec に対してきわめて小さい。この実験では、水路が表層の低透水層の厚さ 5 cm を貫通して、下層の高透水層に通じているか否か、すなわち水路規模 (深さ) が重要なこととなる。

実験結果の一例を示すと 図-16 のようである。図-16 (a) には深さ 2 cm の Canal B と深さ 5 cm の Canal C の 2 つの場合に対する自由水面形が示されている。Canal B の場合 $H=9.4$ cm, Canal C の場合 $H=9.6$ cm でほぼ等しい。図-15 と 図-16 を比較すると、2層地盤系の水路からの距離 x の増加にともなう h/H の値の変化 (図-16) は均質地盤系のもの (図-15) より

図-16 (a) 「2層地盤」の砂模型に対する自由水面形

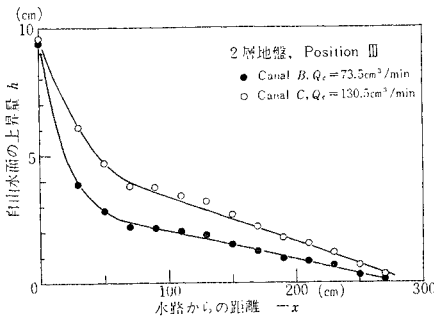
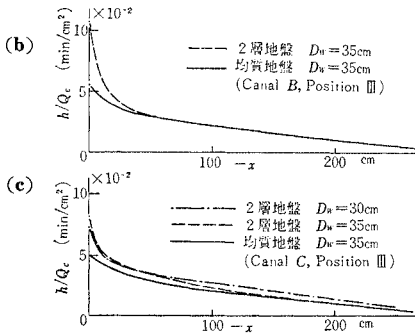


図-16 (b),(c) 「均質地盤」と「2層地盤」の各場合に対する水位上昇割合 h/Q_c と水路からの距離の関係



かなり急激で、水路からの浸透水による自由水面の上昇量は水路近傍でかなり減少することがわかる。このようなことは外水位条件を2層地盤の境界面の高さすなわち砂模型表面下5cmの高さ以上 ($h_E > 35$ cm, $D_W > 35$ cm) にしたときには現われない。それゆえ、自由水面形が単一地層中に現われる条件では、局所的に異常な水位低下はないのであるが、2層地盤系水路浸透では水路水位と外水位との水頭差の大半が水路周辺の低透水層で消費され、急激な水位低下を生じることになると考えられる。

図-16 (b),(c) は図-14 と類似の整理をした図で、Canal B と Canal C に対して、均質地盤と2層地盤の場合を比較するために描いたものである。均質地盤の場合の $h/Q_c \sim -x$ の関係には、水路の規模や形状の影響は少なかったのに対して、図-16 (b) からみると、2層地盤系の場合には水路近傍の $-x$ の小さい範囲で h/Q_c の値は均質地盤のときよりかなり大きくなっている。水路より遠方では h/Q_c の値がほぼ同一になるのに対し、水路近傍では2層地盤系の場合に均質地盤の場合の2倍も大きくなっている。これは水路近傍すなわち表層の低透水層のため水路からの浸透が抑制され、浸透流量に対する水路内の水位上昇率が大きくなるものと解釈される。図-16 (c) に示されている Canal C の場合には、低透水性の表層を完全貫入しているため、図-16 (b) の Canal B の場合ほど差は大きくないが、同様の傾向が認

められる。

c) 水路水位と水路浸透流量について

水路水位と水路浸透流量との関係は、さきに示した解析では式(5)や式(13)によって、水路水位から境界水位までの水位落差や幾何的条件と関係づけられている。ここではこの関係を実験結果から考えてみる。

表-1 に示した種々の場合の実験結果から、水路浸透流量 Q_c と水路内水位との関係をプロットすると、図-17 が得られる。図-17 で、たとえば矢印をつけて示したものは均質地盤の模型の Position I に Canal A を設けた場合に、水路浸透流量 $Q_c = 60$ cm³/min を流すと水路水位は水槽の下面からの高さにして 37.4 cm、換言すると外水位 34 cm から $H_W = 3.4$ cm の高さになり、Canal A の深さは 4 cm であるから水路の湛水深は 1.4 cm になることを意味している。

図-17 水路水位と水路浸透流量の関係

(定水位の場合、ただし計算値(×印)は⑥のとき $k = 3.80 \times 10^{-2}$ cm/sec、他は $k = 2.38 \times 10^{-2}$ cm/sec としている)

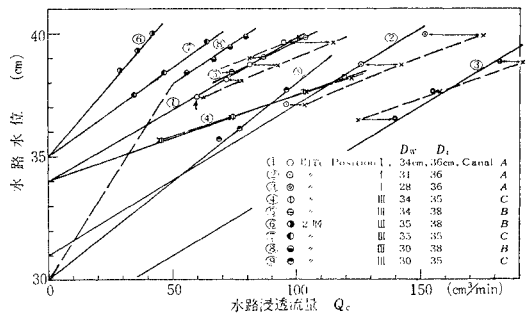


図-17 を概観すると、水路水位上昇量と水路浸透流量との間にはおおそ直線関係が成立していること、換言すると、 Q_c と H_W とは比例関係にあることが認められる。したがって、ここに示されているような範囲では、式(13)の K/K' の値は水位落差 H_W の影響によるものは少なく、おもに水路幅 B と水路側面から境界までの距離 l によって決まってくる傾向がある。図-17 には均質地盤の場合と2層地盤の場合の対比、およびそれぞれの場合の水路が Canal B であるときと Canal C であるときの対比、境界水位の変化した場合の対比がそれぞれできるように示されている。

図-17 の①,②,③の各場合は Canal A が Position I にあるときに境界水位を変えた場合を示している。この程度の範囲 ($D_W = 34$ cm, 31 cm, 28 cm) では、浸透流量 Q_c と水位落差 H_W とはほぼ正比例関係にあり、その増加率もほぼ同じで3つの場合の関係は平行線に近い。一方、Canal A より幅のせまい Canal C を Position III に設けたときの関係が④の線である。これはさきの①,②,③の直線的関係よりもゆるい傾斜となっていて、水路位置が境界の方へ寄ることのために、Position I の場合と同じ水路水位にするためには、浸透流量 Q_c

表-3 (a) 水路浸透流量の計算例 (式 (5) にもとづく), 図-17 の①の場合

実験値			①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑦, ⑧ の	⑨	⑩
Q_c (cm^3/min)	B (cm)	H_W (cm)	B/H_W	L/H_W	$2K/K'$	k^*	$(L/H_W)k^*$	$1-k^*$	③×⑥	①-⑤	大小	③× H_W	Q_c (cm^3/min)
60	6.8	3.4	2.00	92.6	0.550	0.0141	1.310	0.9859	0.542	0.690	<	1.90	62.4
					0.560	0.0158	1.465	0.9842	0.552	0.535	≠		
					0.570	0.0170	1.57	0.983	0.560	0.430	>		
72	8.2	4.1	2.00	76.9	0.580	0.0184	1.416	0.9816	0.570	0.584	<	2.39	78.4
					0.582	0.0186	1.430	0.9814	0.571	0.570	≠		
					0.584	0.0188	1.450	0.9812	0.573	0.550	>		
81	9.4	4.7	2.00	67.0	0.600	0.0212	1.42	0.9788	0.588	0.58	≠	2.82	92.5
95	11.2	5.6	2.00	56.2	0.620	0.0249	1.400	0.9751	0.604	0.600	≠	3.47	114

注: 地盤の透水係数 $k=2.38 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ である。

表-3 (b) 水路浸透流量の計算例 (式 (13) にもとづく) 図-17 の⑤の場合

実験値				①	②	③	④	⑤	③, ⑤ の	⑥	Q_c
Q_c (cm^3/min)	B (cm)	H_W (cm)	l (cm)	B/H_W	l/H_W	K/K'	$(k^*/k')^2$	①-②×④	大小	③× H_W	(cm^3/min)
74	2.6	4.4	36.2	0.591	8.23	0.45	0.0160	0.459	<	1.99	65.5
						0.452	0.0165	0.455	≠		
						0.453					
87	3.5	5.0	35.8	0.700	7.16	0.49	0.0275	0.503	<	2.47	81.2
						0.495	0.0290	0.493	≠		
						0.494					
104	4.7	5.8	35.2	0.811	6.06	0.530	0.045	0.538	<	3.09	101
						0.532	0.046	0.532	=		

注: 地盤の透水係数 $k=2.38 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ である。

はかなり大きくする必要のあることを示している。④の Canal C をさらに小さい Canal B にすると、⑤のようになり、たまたま①の関係と同じ付近に集まるが、ほぼ直線関係となっている。しかし Canal B では水路規模が小さいため、浸透流量 Q_c は Canal C の場合の約6割程度になっている。

2層地盤の場合で、外水位が2地層の境界の高さにある ($D_W=35 \text{cm}$) ときは、Canal B, Canal C に対する $Q_c \sim H_W$ の関係はそれぞれ ⑥, ⑦ のようである (図-17)。Canal C は表層の低透水層 (厚さ 5 cm) を貫通しているので、⑦の直線の傾きは均質地盤の場合の⑤に近いが、やや急傾斜を示して、水路浸透は⑤の場合より浸透しにくい。水路が表層内にとどまっている Canal B の場合の⑥の直線は⑦よりいっそう強くその傾向を示して、わずかの流量 Q_c で水路水位は上昇し、地盤へ浸透しにくいことを示している。外水位を2地層の境界面より低く、たとえば砂模型表面から 10 cm 下の高さにした場合には Canal B と Canal C による差が大きくなってくる。すなわち Canal C の場合の⑨はさきの⑦の場合とほぼ同じ傾斜を示し、かつ Q_c と H_W とは正比例関係にあるのに対して、Canal B の場合の⑧では、水路底面の高さから外水位までのところに著しい水位落差を生じている。このような関係は水路浸透による自由水面の上昇量の関係においてもみられたことであった。

水路浸透流量 Q_c を式 (5) または式 (13) によって計算して、実験値と比較してみよう。図-17 に示した①と

⑤の各場合に対する計算例を表-3 に示した。この計算においては、①の場合は Canal A で、⑤の場合は Canal B であるが、式 (5) などの計算に用いる水路の幅 B は水路底面幅ではなく、水路の湛水面の幅にとり、水位落差 H_W は水路水面から外水位までの落差をとっている。また①では水路は砂模型中央にあるとし、⑤では $l=37.5 \text{cm}$ とした。砂模型の透水係数は $k=2.38 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ としているが、これは砂模型の両端の一定水位差による2次元定常浸透状態の流量と水面傾度の観測値から算出したものである。表-3 に示されている水路浸透流量 Q_c の計算値と実験値との誤差は約1割程度以内で、比較的良好に合致しているといえよう。

表-3 の計算値およびさらに3つの場合 (②, ③, ④) の計算値を 図-17 に併記した。実験値 (○印) と計算値 (×印) の間にはずれがあるが、これは透水係数の値がすべての場合に等しくなっていない懸念があるため、必ずしも大ききなずれであるとはいえない。しかし $Q_c \sim H_W$ の関係としてみると、浸透流量 Q_c の増減にともなう水路水位の昇降の割合は実験値の方が計算値よりも若干大きくなる傾向にある。

(3) 「定流量の場合」の実験結果

a) 水路浸透による水位上昇量 h について

「定流量の場合」の水路浸透では、砂模型左方の境界を上流側とみなして、一定の流量 $Q_E = bq_E$ を地下水伏流として流す。流量 Q_E による流れが定常状態となるまで流し続けるのであるが、その際左方の貯水位面の水面積

が大きければ、その水位変化の応答は遅いので、小面積にしておくほうが好都合である。そこで定水位で行っていた実験の場合の砂模型の左端の貯水面をさらに砂模型と同一の豊浦標準砂で埋め、この部分の水面積は約 $10\text{ cm} \times 25\text{ cm}$ にした。そのため砂模型の長さは約 35 cm 長くなって、 $L \div 360\text{ cm}$ になっている。「定流量の場合」の実験はすべて均質地盤に対して、Canal F を Position III に設けた場合としている ($L_R = 37.5\text{ cm}$)。

さて実験では、伏流流量 Q_E のみによる自由水面を観測する。つぎに流量 Q_E はそのまま流し続けた状態で、水路から $Q_c = bq_c$ なる流量を浸透させる。そうすると水路近傍の自由水面は上昇し始める。ある時間経過すると、定常状態とよばれる平衡状態に達する。図-18には、一例として $Q_E = 32\text{ cm}^3/\text{min}$ 、 $Q_c = 100\text{ cm}^3/\text{min}$ 、下流端水深 $D_W = 15\text{ cm}$ 、水路底面下の透水層厚さ $D_i = 20\text{ cm}$ の場合の水路浸透開始後の自由水面の変化が示されている。この場合には約180分後に、水路浸透の流れ系は平衡状態に達した。この定常状態に達したときの自由水面は伏流流量 Q_E だけによる自由水面より h だけ水位

図-18 水路浸透開始後の自由水面の時間的变化 (定流量の場合)

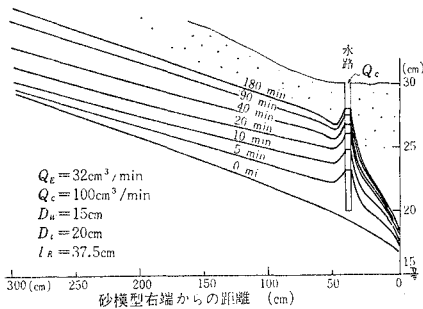


図-19 「定流量の場合」の自由水面形

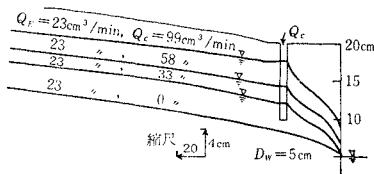


図-20 水路浸透流量に対する自由水位上昇量の比と水路からの距離との関係 (定流量の場合)

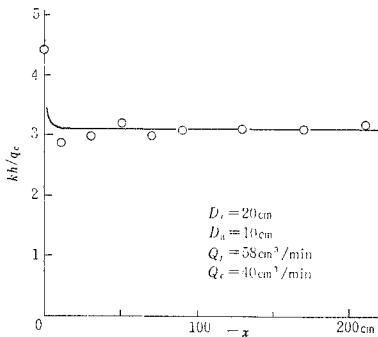


図-21 「定流量の場合」の水路浸透における流線網

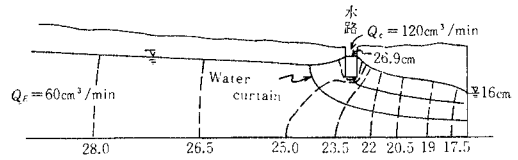
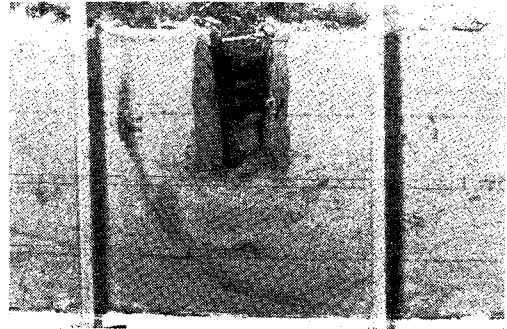


写真-3 Water curtain が認められる写真



上昇するが、その2,3の例を 図-19 に示す。水路浸透流量 Q_c の増加につれて、水位上昇量 h も増加することが明らかである。水路より上流側の水位上昇量 h と水路からの距離 x の関係を描くと 図-20 が得られる。図-20 のたて座標は無次元化してあって、「定水位の場合」の 図-14 と対比できるようにしてある。水位上昇量 h は距離 x とは無関係にはほぼ一定値を示すことがわかる。

水路より上流側の自由水面が、水路浸透により元の自由水面とほぼ平行な高さまで上昇する関係を検討するため、一例について流線網を描くと 図-21 のようであった。この流線網は水路周辺 5 cm 間隔の格子点での水頭測定と全般にわたる水槽底面での水頭測定に基づいて作成されている。水路断面形は金網でつくられているため、若干凹凸があり、水路近傍の等ポテンシャル線は若干乱れている。しかし 図-21 で予期されるように、上流からの伏流水と水路からの浸透水との境界に Water curtain とよばれる一種の境界が生じることが色素(ウラン)の動きにより観察された。すなわち、水路よりかなり上流地点に投入した色素は水路近傍までくると、その境界の下をもぐり速度を早めて流下する。一方、水路側壁に投入した色素はしだいに拡がり、Water curtain 付近に集まって、その形状のはっきり認められた(写真-3)。この Water curtain の規模は水路浸透流量 Q_c と伏流流量 Q_E の大小関係によって左右され、水路浸透流量 Q_c が大きくなると大きくなる傾向にある。

さて、多数の実験の結果、水路浸透流量 Q_c とそれによる水位上昇量 h との関係は 図-22 (a) に示されている。明らかに Q_c と h との関係は「定水位の場合」と同様ほぼ比例関係にある。しかし細かくみるとかなりのバラツキがあるので、 h/H_W と $Q_c/(Q_c + Q_E)$ との関係に再整理すると 図-22 (b) のようになって、よい直線関

図-22 (a) 水路浸透流量と自由水位上昇量の関係 (定流量の場合)

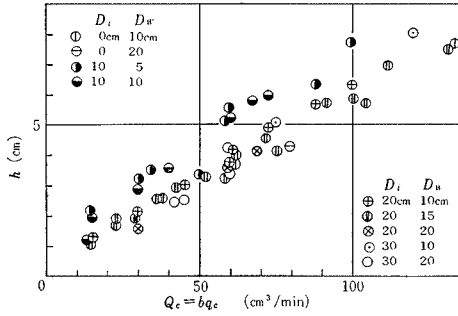
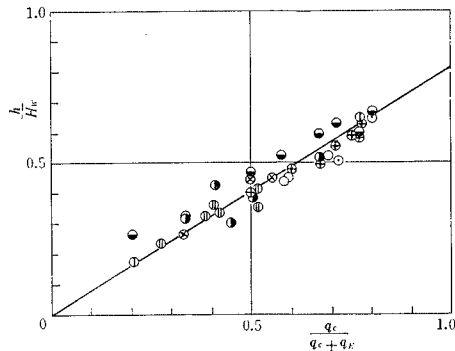


図-22 (b) 水位上昇比 h/H_W と流量比 $q_c/(q_c + q_E)$ の関係



係の成立が認められる。すなわち、図-22 (b) から

$$\frac{h}{H_W} = 0.8 \times \frac{q_c}{q_c + q_E} \quad \dots\dots\dots(27)$$

「定水位の場合」の水路浸透による自由水面の上昇量 h は水路からの距離とともに指数関数的に減衰する分布で表わされるのに対して、「定流量の場合」の自由水面形は伏流水による元の水面形をほぼ平行に上昇させたものになって、その水位上昇量 h は近似的に式 (27) で表わされるものとなる。

「定流量の場合」の流れの特性を表わすと考えられる、水路より上流側自由水面の最低点 M_0 の高さは理論的解析によると、式 (20) と式 (21) により与えられる。いま、この点 M_0 の y 座標 (図-4 (a)) の値 y_0 を計算するまえに、流れ系Ⅲの q_{c3} 、すなわち近似的に q_c と等しいと考えている q_{c3} を算出するために設定した関係式 (26) の低減係数 κ を検討しておく。実験の模型水槽に流れた水路浸透流量 q_c と幾何的条件を式 (13) に用いて計算される q_{c2} との比 $\kappa = q_c/q_{c2}$ がどのような量によって決定されるかという問題の検討である。すでに述べたように $q_{c3} = q_c$ と考えると、式 (13) から $q_{c2}/k = KH_W/K'$ であるから、次式が成立する。

$$\kappa = \frac{q_{c3}}{q_{c2}} = \frac{q_c/k}{KH_W/K'} \quad \dots\dots\dots(28)$$

この値と実験で観測されている H_W 、水路幅 $B=4$ cm および $l_R=37.5$ cm の値から式 (13) にもとづいて計

算される $KH_W/K'B$ という値とを比較したところ、図-23 のようであって、

$$\kappa \equiv \frac{q_c/k}{KH_W/K'} = \frac{KH_W}{K'B} \quad \dots\dots\dots(29)$$

なる関係がみいだされる。式 (29) を式 (13) と結合すると、つぎの関係を得る。

$$\frac{B}{H_W} - \left(\frac{k^*}{k^{*'}}\right)^2 \cdot \frac{l}{H_W} = \frac{K}{K'} = \sqrt{\frac{q_{c3}}{kH_W} \cdot \frac{B}{H_W}} \quad \dots\dots\dots(30)$$

さて、図-4 (a) に示されている点 M_0 の座標の値 y_0 の実験値と計算値を比較したのが 図-24 である。計算にあたっては式 (24) に現われている T のとり方が問題となる。解析 2. (3) では水路内の湛水深は零であって、水路水位は水路底面の高さであり、 T はその水路底面から不透水面までの深さとなっている。しかし実験では水路内に若干の湛水を生じるため、水路水位と水路底面は一致していない。図-24 の計算値を求める際には、水路水位から不透水面までの深さを T として採用した。その理由は湛水深の影響が実験結果にあまり認められないため、解析における y 座標は水路水位を基準にとると解釈したほうが合理的であるからである。図-24 に示された計算値と実験値とは必ずしもよい一致を示しているということとはできなくて、この境界値問題の複雑さを

図-23 Q_c/kB と低減係数 κ との関係

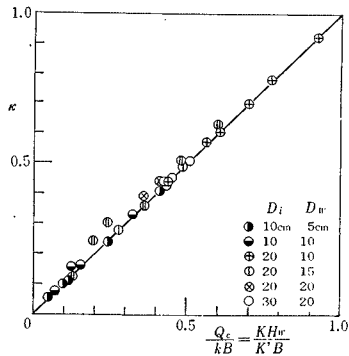
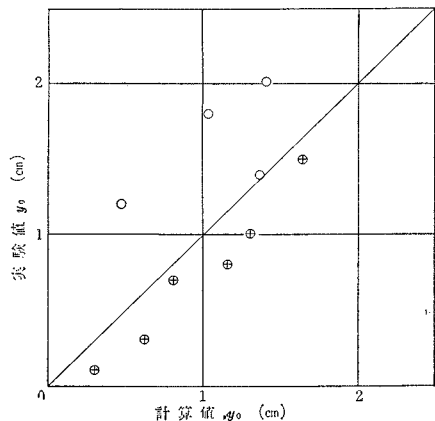


図-24 水路水位から上流側自由水面の最低点までの落差 y_0



示している。点 M_0 の x 座標の値 x_0 は式 (20) の a の値を式 (23) に代入することによって得られるはずであるが、式 (23) の形では不定形となるため、その計算は困難である。

したがって、現在のところ、実験的に得られている式 (27) が水路浸透による自由水位上昇量と水路浸透流量、伏流量との関係を近似的に表わすと考えることができる。これは実験条件として、 $l_R=37.5$ cm, $D_i=0\sim30$ cm, $q_E/k=0\sim1.83$ cm ($k=2.38\times 10^{-2}$ cm/sec として), $q_c/k=0.457\sim7.63$ cm に対して模型水路の大きさが幅 $B=4$ cm, 灌水深が $0\sim10$ cm という範囲にあるときに成立するものであることに留意せねばならない。しかし、たとえば琵琶湖西の地下水の豊富な地域で、 $q_E/k=0.104$ t/hr/m $\div(1.3\times 10$ m/hr) $=0.8$ cm なる値が推定されているので¹⁰⁾、上述の実験条件の範囲は必ずしもせまいものでないことが理解されるであろう。

b) 水路水位と水路浸透流量について

表-2 に示されている種々の場合の実験から得られた水路水位と水路浸透流量の関係は 図-25 に描かれている。図-25 は「定水位の場合」の 図-17 と同様の整理を行なったものである。水路浸透流量 Q_c に対する水路水位上昇量の増加率 (図-25 の直線部の傾斜) はほとんどすべての場合に対してほぼ等しいことがわかる。図-25 で流量 $Q_c=0$ の場合の水位は外水位を表わしている

が、 $Q_c > 15$ cm³/min に対応する水路水位と流量 Q_c の直線関係を延長して、 $Q_c=0$ に対応する水路水位を考えると、これは外水位よりもほぼ $1\sim2$ cm 高い。しかし $D_i=0$ の場合、すなわち水路が深く、透水層を貫通している (いわゆる「横井」とよばれる) 場合は、水路水位と水路浸透流量との直線関係が $Q_c=0$ のときにも成立していることが注目される。このことは左方境界の外水位と水路水位との差による流量 Q_E が水路 (横井) に流れ込み、水路と右方下流貯水池との間では流量 (Q_c+Q_E) が流れ、水平成分がおもな浸透流となっていることを意味する。一方、 $D_i=10$ cm, 20 cm, 30 cm の各場合には、水路下の透水層内に Water curtain が生じ、水路浸透による鉛直成分が発生するため、 D_i が大きくなるにつれて水路浸透流量 Q_c と水路水位との直線関係が $Q_c=0$ のときの外水位との間にまで成立しなくなるものと考えられる。

なお、「定流量の場合」の水路浸透流量 $Q_c=bq_c$ の量的検討は前項で示したように、式 (29) や式 (30) などによって評価することができる。

4. 結 論

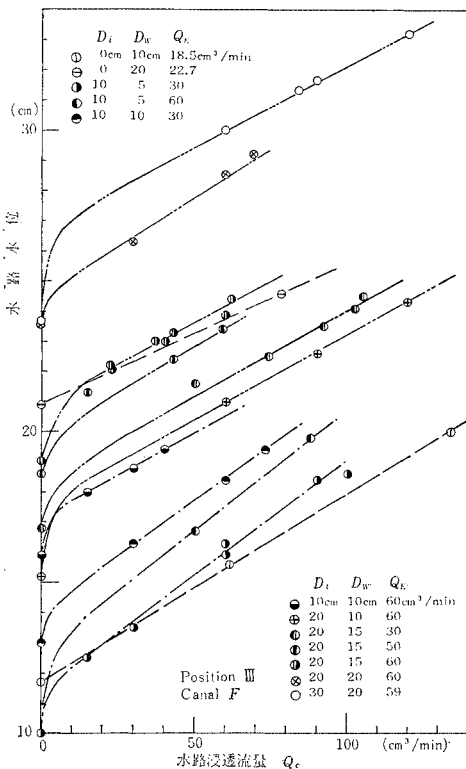
本文は水路からの浸透水による自由水面の上昇量と水路浸透流量の関係を検討したものである。地盤は均質であるとして (2層地盤の場合も若干したが)、水路より下流側の境界水位が一定に保たれている場合に、上流側境界条件としてつぎの2種類のものに対して研究した。すなわち上流側有限距離の地点において、一つは水位を一定に保つ場合 (定水位の場合)、もう一つは伏流量を一定に保つ場合 (定流量の場合) である。水路から地盤への定常浸透に関する実験的・解析的検討の結果得られた事項を要約するとつぎのようである。

A. 定水位の場合の水路浸透に対して

(1) 半無限透水性地盤上の水路からの浸透流量は地盤の透水係数に比例し、流れ系 I (図-2 (a)) に対しては式 (5)、流れ系 II (図-3 (a)) に対しては式 (13) により与えられることが理論的解析からわかっているが、有限厚さの透水性地盤に対応する模型実験 (水路底面下の透水層の厚さ D_i が水路幅 B の数倍以上になっている場合の実験) で観測した水路浸透流量と水路幅 B を水面幅にとって式 (5) や式 (13) から求めた計算値とはかなりよい一致をみた。

(2) 水路浸透による自由水面形は流れ系 I に対して式 (9) により、流れ系 II に対して式 (17) および式 (18) によりそれぞれ表わされることを理論的に求めた。しかし室内実験から観測された自由水面の上昇量は水路と水理境界の中央付近で、上述の式からの計算値より最大約3倍大きくなり、かなりのずれを認めた。それは両者における条件の相違、たとえば地盤透水層の厚さ、水路内

図-25 水路水位と水路浸透流量の関係



湛水深の有無や毛管帯の有無などに起因するものと考慮されるが、流量についてはよい一致をみるのに対して水位上昇量についてかなりのずれがみられる点今後検討されなければならない。

(3) 水路浸透による自由水面の上昇量は浸透流量にほぼ正比例する。

(4) 水路浸透による自由水面の上昇量は水路からの距離に関して指数関数的に減衰する分布となる。

「定水位の場合」であるが、低透水性の薄層が上部にある透水性地盤という「2層地盤系」に対する水路浸透実験からはつぎの興味ある観察が得られた。

(5) 「2層地盤」の場合は水路が低透水性の表層を貫通しているか否か、また外水位が2層層の境界面より高いか低いか重要な問題となる。「外水位が高い」場合および「水路が貫通している」場合の自由水面の上昇量は「均質地盤」の場合と類似する。しかし外水位が低く、水路が浅くて下層に「貫通していない」場合の水面形は水路からの距離とともに急激に低下する。

(6) 水路浸透による自由水面の上昇量は、水路近傍ではおもに水路周辺の透水性によって規定され、遠方ではおもに水路浸透流量の多少によりきまるようである。

B. 定流量の場合の水路浸透に対して

(1) 定流量の場合の水路浸透流量は基本的な流れ系Ⅱ(図-3(a))と流れ系Ⅲ(図-4(a))の解析結果と組み合わせることにより、式(30)によって与えられることを実験的に検証した。すなわち有限厚さの透水性地盤に対する定流量の場合の水路浸透流量は半無限地盤への水路浸透流量 q_{c2} に低減係数 κ (式(29)) を乗ずることにより得られる。

(2) 自由水面形の解析は困難であるが、水路浸透による水路より上流側の自由水面の上昇量は、水路下部に形成される Water curtain によるせき上げの結果として、かなり認められる。その上昇量は式(27)の実験的關係式で表わされる。

(3) 水路浸透による水路より上流側の自由水面は水路浸透流量にほぼ比例して上昇する(これは定水位の場合と同じである)。

(4) 前項(3)の水位上昇量は水路からの距離に無関係にほぼ一定値になる(これは定水位の場合と異なる)。

本研究は京都大学工学部において、赤井浩一教授のご指導を賜わりつつ実施されたものであって、ここに同教授に深甚の謝意を表す。また当時の京都大学大学院学生 西村伊久夫君、同大学学生 磯浦克敏君には実験や整理の面で多大の助力を受けた。さらに、この研究を進めるうえでは建設省近畿地方建設局琵琶湖工事事務所前所長 稲田裕氏、現所長 金屋敷忠儀氏ら多数の方から種々の助言をいただいた。ともに深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) Kozeny, J.: "Grundwasserbewegung bei freiem Spiegel, Fluss- und Kanal-versickerung", Wasserkraft und Wasserwirtschaft, 3 Heft, 26 Jahrg., pp. 28-31 (1931).
- 2) Morel-Seytoux, H.J.: "Domain variations in channel seepage flow", Proc. of ASCE., Vol. 90, No. HY 2, pp. 55-79 (1964).
- 3) Harr, M.E.: "Groundwater and seepage", McGraw-Hill Book Co., pp. 246-248 (1962).
- 4) Muskat, M.: "Flow of homogeneous fluids", Edwards, pp. 348-353 (1946).
- 5) Bouwer, H.: "Theoretical aspects of seepage from open channels", Proc. of ASCE., Vol. 91, No. HY 3, pp. 37-59 (1965).
- 6) 前掲 4); pp. 331-336.
- 7) Hammad, H.Y.: "Seepage losses from parallel channel systems", Proc. of ASCE., Vol. 86, No. EM 4, pp. 43-50 (1960).
- 8) Uno, T.: "Seepage from a canal into ground with a shallow water depth", Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyoto Univ., Vol. 27, part. 4, pp. 394-407 (1965).
- 9) Polubarinova-Kochina, P.Ya.: "Theory of groundwater movement", Princeton Univ. Press, Princeton, pp. 215-227 (1962).
- 10) 赤井浩一・宇野尚雄: "琵琶湖岸土層調査報告書", 近畿地方建設局琵琶湖工事事務所・財団法人防災研究協会, p. 137 (昭和41年3月).

記号の説明

- a : 点 M_0 (図-4) の ζ -平面上の ξ の値
- b : 実験水槽の幅 (cm)
- B : 長方形水路の幅 (cm)
- α : 不透水面 (図-4) の傾角 $\alpha\pi$ を表わす係数
- β : パラメータ (たとえば式(24))
- ε : パラメータ (式(24)参照)
- D_i : 水路下部の透水層厚さ (図-11(a)参照, cm)
- D_W : 下流端貯水池の水深 (cm)
- h : 水路浸透による自由水面の上昇量 (cm)
- H : 水路浸透による水路位置の自由水位上昇量 (cm)
- H_W : 水路水位から境界水位までの水位落差 (cm)
- h_E : 地盤の上流境界における水深 (cm)
- k : 地盤の透水係数 (cm/sec)
- κ : 低減係数
- K, K' : それぞれ母数 k^*, k'^* の第1種完全だ円積分
- k^* : 母数, k'^* : 補母数, $k^{*2} + k'^{*2} = 1$
- l : 水路から下流境界までの距離 (cm)
- L : 流れ領域の全長 (cm)
- l_R : 砂模型右端 (下流側) から水路中心までの距離 (cm)
- l_L : 砂模型左端 (上流側) から水路中心までの距離 (cm)
- q_{c1} : 流れ系Ⅰ (図-2(a)) の水路浸透流量 (cm³/sec/cm)
- q_{c2} : 流れ系Ⅱ (図-3(a)) の水路浸透流量 (cm³/sec/cm)
- q_{c3} : 流れ系Ⅲ (図-4(a)) の水路浸透流量 (cm³/sec/cm)
- $q_{E'}$: 流れ系Ⅲ における上流からの伏流流量 (cm³/sec/cm)
- $q' = q_{c3} + q_{E'}$
- q_c : 室内実験で観測された水路浸透流量 (cm³/sec/cm)
- q_E : 室内実験で観測された上流からの伏流流量 (cm³/sec/cm)
- $Q_c = bq_c$ (cm³/sec または cm³/min), $Q_E = bq_E$ (cm³/sec または cm³/min)
- T : 水路水位面から地盤不透水面までの深さ
- ω : 複素ポテンシャル, $\omega = \varphi + i\psi$, φ : 速度ポテンシャル, ψ : 流れ関数, i : 複素記号 ($i = \sqrt{-1}$)
- ζ : 補助の複素平面, $\zeta = \xi + i\eta$
- θ : Zhoukovsky の関数 (補助の複素平面)
- t : 補助変数 ($\zeta = k^{*2}t^2$)
- z : 実平面 $z = x + iy$ (x : 水平方向, y : 鉛直方向)
- $sn(u, k^*)$: Jacobi のだ円関数
- $dn(u, k^*)$: 同上, $k^{*2}sn^2(u, k^*) + dn^2(u, k^*) = 1$