

(3) 雨水浸透池の目詰と長期涵養サイクルのシミュレーション

A Study on Clogging of a Recharge Basin

山崎惟義*、和泰**、中山比佐雄***、堤敦****

Koreyoshi YAMASAKI, Hetai, Hisao NAKAYAMA, Atushi TUTUMI

ABSTRACT: Seepage impedance caused by clogging which appears in surface water drainage and ground water recharge facilities reduces the operation efficiency. In the mathematical model of the clogging, the filter cake was introduced as the main mechanism. Obtaining the model parameters through a series of experiments, we carried out short term recharge simulations and compared the results with model experiment results. Conducting a shrinking factor and a cracking factor of the cake, we carried out long term recharge simulations and compared the results with the those of an actual recharge basin. These comparisons show good agreements.

KEYWORDS: Recharge basin, Clogging, Filter cake, Mathematical modeling, Long term simulation

1. はじめに

森林、農牧地の都市化は表面流出の増大と地下水の枯渇をもたらしている。この両方を同時に解決する方法として雨水の地下浸透が注目されている。雨水浸透のための施設としては屋根などに降った水を浸透升等を通して浸透させる雨水浸透施設と地表に降った雨を一旦貯留し貯留池から浸透させる雨水浸透池がある。これらの浸透施設からの浸透については浸透能に関するものを中心に浸透施設付近の浸透流に関する広範な研究がなされている。特に浸透升などの浸透施設に関しては飽和不飽和浸透流に関する理論的、実験的研究が多数なされている。しかし、これらの施設で最も懸念される浸透施設の目詰に関する研究については実験的研究が散見されるのみで目詰機構の解明を含めた理論と実験による理論の検証に関する研究はほとんど見られない。

本研究では雨水浸透施設、特に目詰が問題になると考えられる懸濁粒子を高濃度に含んだ表流水を浸透させる雨水浸透池の目詰と浸透池の水位降下について理論的に検討し、目詰と水位降下に関する数学的モデルの構築および水位降下のシミュレーションを行なった。また、モデル実験と実証実験により本モデルの検証を行なった。

2. 浸透池目詰のメカニズム

一般に、目詰は複雑な現象と考えられる。ここで検討しようとしている浸透池の浸透層である底面下の層の目詰も、懸濁粒子の沈降並びに懸濁液の濾過によって浸透層表面に形成される粒子層（以

* 福岡大学工学部土木工学科 (Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering Fukuoka University)

** 内蒙古農牧学院水利系 (Department of Hydraulic Engineering, Inner Mongolian College of Agriculture)

*** 株式会社建設技術研究所 (C.T.I. Engineering L.T.D.)

**** ジオスコ (GEOSCO)

下ケーキと呼ぶ)の形成、浸透層への粒子の侵入による空隙の梗塞および形成されたケーキの圧密などによる物理的目詰、溶解性物質の沈殿や浸透層を形成する物質との反応などによる浸透層間隙の梗塞のような化学的目詰、さらに細菌によるケーキ粒子や浸透層粒子表面へのスライム形成やケーキ表面における藻類の増殖などによる生物学的目詰が考えられる。しかし、一定の条件下での実際の施設における目詰では、上記の全てが問題になるのではなく、それらの幾つかの現象が支配的になると考えられる。

本研究で取り扱おうとしている雨水浸透池では、流入する表流水の有機性汚濁物質濃度は低いと考えられ、細菌による目詰は支配的とは考えられない。また、浸透池に水が溜まっているのはさほど長期にわたるとは考えられないので藻類の増殖に十分な時間はないと考えられる。流入水に含まれる粒子は砂やシルト程度の粒径の粒子が殆どと考えられ粘土等の量はさほど多いとは考えられない。また、浸透池の水深は数(m)程度で、さほど大きくなくケーキの圧密による目詰も支配的とは考えられない。このような条件下では懸濁粒子の沈殿と懸濁液の濾過によって底面上に形成されるケーキによる目詰が支配的と考えられる。

3. 浸透池の目詰理論

3. 1 初期涵養サイクルについて

雨水浸透池では、出水時に雨水を一旦池内に貯留し徐々に地下へ浸透することになる。この貯留・涵養のサイクルを涵養サイクルと呼ぶことにする。特に最初のすなわち底層がまだ目詰を起こしていないサイクルを初期サイクルと呼ぶことにする。実際には出水毎に涵養サイクルが繰り返されるが、ここではまず初期涵養サイクルにおける目詰について検討する。

浸透池の概念図を図1に示した。前述のメカニズムを考慮し、次のような仮定を設定する。
 ①浸透池は直方体である。②浸透池に懸濁液が急速に注入され、その後浸透によって水位が低下する。③浸透池内の水は底面のみを通して流出する。④浸透流は全て飽和浸透流とする。⑤浸透流は鉛直方向一次元浸透流と見なし得る。⑥浸透池底面は砂層(底層と呼ぶ)で形成されておりその下はより透水性の高い層からなっている。⑦底層直下のピエゾ水頭は一定である。⑧ケーキと底層の透水係数は一定であり、懸濁粒子の沈殿と濾過によってケーキの厚さのみが変化する。

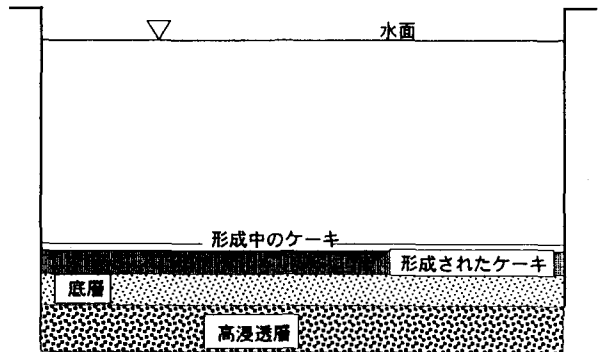


図1 雨水浸透池の概念図

以上の仮定によって底層を透して流下する浸透フラックス q (m/s) は次式で表わされる。

$$q = \frac{Q}{A} = \frac{K_1 K_0}{K_1 + K_0} \Delta h \quad (1)$$

ここで、 Q は浸透池からの流出流量 (m^3/s)、 A は底面面積 (m^2)、 Δh はケーキ表面と底層下面とのピエゾ水頭差 (m) であり、 K_1 、 K_0 はそれぞれフィルター ケーキ、底層の浸透係数 ($1/s$) で $K_1 = k_1/d_1$ 、 $K_0 = k_0/d_0$ と定義する。ただし k_1 、 k_0 はケーキ、底層の透水係数 (m/s) d_1 、 d_0 はケーキ、底層の厚さ (m) とする。

ここで、 m を単位底面上に形成されたケーキの質量 (kg/m^2) とすると、その層厚 d_1 は $d_1 = \beta m$ と表わされる。ただし、 β は定数である。従って、 $K_1 = k_1/\beta m$ となる。ここで、 α ($m^2 s/kg$) を β/k_1 で定義 (比抵抗と呼ぶ) すると $K_1 = 1/\alpha m$ と書け、 q は次式で表わされる。

$$q = \frac{K_0 \Delta h}{1 + \alpha m K_0} \quad (2)$$

底面層直下の間隙水圧が一定で 0 とおけ、底面層の層厚 d_0 とケーキの層厚 d_i が池の水深 H (m) に比較して無視し得るとすると、 $\Delta h = H$ となる。また、池の水面面積が水深に対して一定と仮定しているから、 $q = -dH/dt$ とおけ、式(2)は次式のようにかける。

$$\frac{dH}{dt} = -q = -\frac{K_0 \Delta h}{1 + \alpha m K_0} \quad (3)$$

ケーキは懸濁粒子の沈降と懸濁液の濾過によって形成されるとしているので、ケーキの生成速度 dm/dt は懸濁粒子の沈降速度分布を考慮して

$$\frac{dm}{dt} = \sum_i (q + v_{si}) C_i \quad (4)$$

と表わされる。ただし、 C_i は沈降速度 v_{si} (m/s) を持つ懸濁粒子(i 粒子群と呼ぶ)のケーキ表面付近における濃度 (kg/m^3) である。粒子の沈降速度は凝集などにより変化することはないとすると、沈降開始時より $t = H/v_{si}$ までの間に v_{si} 以上の沈降速度を持つ粒子は全て沈降しているので懸濁液中には存在しない。したがって C_i は

$$C_i = \delta_i C_{0i} \quad (5)$$

と表わされる。ただし、 C_{0i} は i 粒子群の初期濃度 (kg/m^3) であり、 $v_{si}t < H$ の時 $\delta_i = 1$ 、 $v_{si}t > H$ の時 $\delta_i = 0$ である。式(4)、(5)より

$$\frac{dm}{dt} = \int_0^{H/t} (q + v) \frac{dC}{dv} dv \quad (6)$$

が得られる。ここで、 dC/dv は懸濁粒子の沈降速度分布関数 $\phi(v)$ により

$$\frac{dC}{dv} = C_0 \phi(v) \quad (7)$$

と表わされる。ここで、 C_0 は初期の懸濁物質濃度 (kg/m^3) である。

$\alpha, C_0, \phi(v), K_0$ が得られれば、水深の初期値を H_0 、初期のケーキ量を m_0 (初期涵養サイクルでは $m_0 = 0$ である) として式(3)と式(6)とを連立させて解くと水深 H が時間の関数として得られる。 C_0 は流入水の懸濁物質濃度として、 $\phi(v)$ はその沈降速度分布として予測され得、 K_0 は浸透池の底面の値を実測または予測され得ると考えられる。従って α のみが残されるがこれは次の様にして得られる。

式(6)において、初期のケーキの堆積がない場合、単位底面積当たりの浸透開始からの累加浸透水量を V とし、粒子の沈降速度 v が無視でき、懸濁物質濃度 C が一定であれば $m = CV$ が得られる。これを式(2)に代入し、水深 H を一定とすると

$$\frac{dV}{dt} = \frac{K_0 H}{1 + \alpha CV K_0} \quad (8)$$

が得られる。 $t = 0$ において $V = 0$ を考慮して上式を積分すると

$$V + \frac{\alpha CK_0 V^2}{2} = K_0 H t \quad (9)$$

が得られ、

$$1 + \frac{\alpha CK_0 V}{2} = \frac{K_0 H t}{V} \quad (10)$$

と変形できる。上式は Ruth の定圧濾過式¹⁾と同型である。従って、 V に対して t/V をプロットするとその勾配から α が求まる。

3. 2 2回目以降の涵養サイクルについて

2回目以降のサイクルでは、前回のサイクルまでで既にいくからのケーキが形成されており、底層が目詰を起こしていることを考慮する必要がある。そこで、 n サイクルまでに生じたケーキと底層の合成浸透係

数を K_n ($1/s$) とおくと、 $n+1$ 回目の涵養サイクル中で式(3)は

$$\frac{dH}{dt} = -\frac{K_n \Delta h}{1 + \alpha m K_n} \quad (11)$$

となる。ケーキの圧縮、収縮やひび割れなどによる変化がない場合 K_n (これを K_n^A で表わす) は次式で表わされる。

$$K_n^A = \frac{1}{1/K_0 + \sum_{i=1}^n 1/K'_i} \quad (12)$$

ここで、 $K'_i = k'_i/d'_i$ で d'_i, k'_i はそれぞれ i サイクルで形成されたケーキの層厚 (m) および透水係数 (m/s) である。また式 (2)により、 K'_i をケーキ質量と比抵抗で表わすと式 (12) は

$$K_n^A = \frac{1}{1/K_0 + \sum_{i=1}^n \alpha m_i} \quad (13)$$

ここで m_i は i 涵養サイクルで形成させたケーキの質量であり、 α は一定としている。

さらに2回目以降のサイクルでは長期間の水圧による圧密あるいは乾燥によるケーキの収縮のために透水能が減少する可能性がある。そこで K_n^A を

$$K_n^B = \frac{1}{1/K_0 + \sum_{i=1}^n \gamma \alpha m_i} \quad (14)$$

と修正する。ここで γ は収縮圧密などによる比抵抗の増加係数である。さらに乾燥による収縮が進行すると、ケーキにひびが生じこのため透水能が増加する。この効果を R_n で表わし、 α, γ を一定とすると、式 (14) は次のようになる。

$$K_n = \frac{1}{1/K_0 + R_n \gamma \alpha M_n} \quad \text{ここで} \quad M_n = \sum_{i=1}^n m_i \quad (15)$$

4. 初期涵養サイクルのシミュレーションとモデル実験

4. 1 シミュレーション

初期涵養サイクルのシミュレーションと比抵抗の測定については既に詳細に報告^{2), 3)}しているのので、ここではその結果のみを示す。

懸濁粒子としてクロボクを用いた。このクロボクについては、沈降速度分布⁴⁾、ケーキとしての比抵抗 α を測定した²⁾。図2には対数正規確立紙上に沈降速度分布を示した。この図から実験に用いたクロボクの沈降速度分布はほぼ対数正規分布に従うと

考えられ、その平均沈降速度 $\bar{v}$ は $10^{-5.87}$ (m/s)、対数標準偏差 σ は 0.7 程度と考えられる。また、クロボクの比抵抗 α として 10^4 ($m^2 s/kg$) を得た。

上記の係数を用いて式(3)と、式(6)を連立させて計算を行った。ただし、初期水深は 4.5 (m)、初期懸濁物質濃度は 2.8 (kg/m^3)、1.8 (kg/m^3)、0.7 (kg/m^3) で行った。その結果を図4に示した。

4. 2 涵養モデル実験

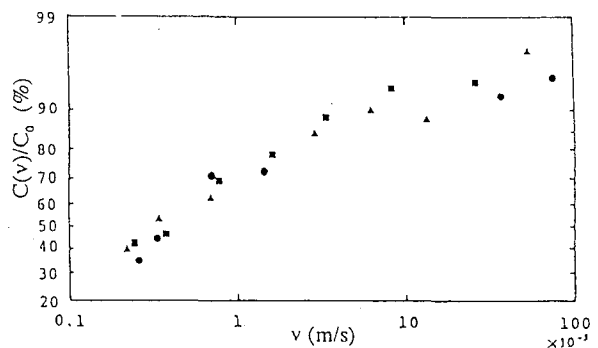


図2 懸濁粒子の沈降速度分布

前記のモデルを検証するために涵養モデル実験を行った。

a) 実験方法

図3に実験装置を示した。本装置は主に、懸濁液貯留タンク、下部にスライドバルブおよびろ過層さらにその下部には流出口と流出バルブを有する円筒よりなる。ろ過層としては標準砂を用いた。

スライドバルブと流出バルブを閉じて、懸濁液を貯留タンクから所定の水深になるように円筒に流し込む。ただちにスライドバルブと流出バルブを開けて浸透を開始させる。浸透開始より水深を圧力センサーにより経時的に測定した。

実験は初期水深 4.5 (m) 懸濁物質濃度 $2.8 (kg/m^3)$, $1.8 (kg/m^3)$, $0.7 (kg/m^3)$ で行った。

b) 実験結果

実験結果を図4に示した。また、同図にはシミュレーションの結果も示されている。

c) 比較検討

図4から初期涵養サイクルにおいてはシミュレーションの結果と実験結果はほぼ一致していることがわかる。

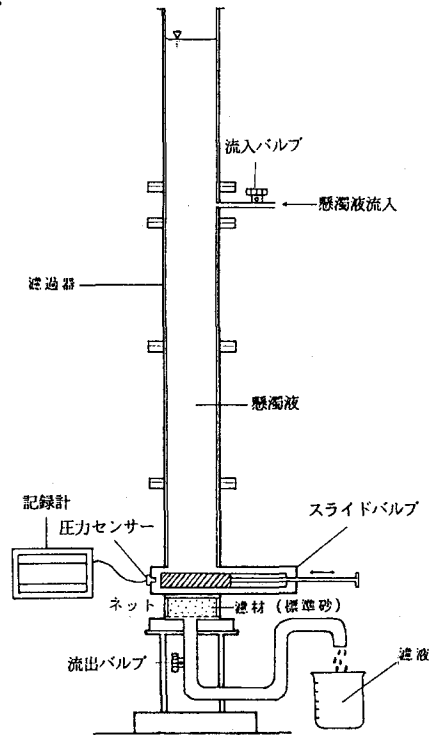


図3 涵養モデル実験装置

5. 長期涵養サイクルの実証実験とシミュレーション

5. 1 実証実験

阿蘇山麓の菊陽台地（熊本県）に建設された雨水浸透池を使って、昭和63年から平成3年までの4年間にわたり、濁水による現場浸透実験が熊本県により行われた。実験池の概要及び実験方法は以下の通りである。

a) 実験池の概要

図5に示したように、実験池は沈砂池（池底面積：33.5m×17.0m）と浸透池（池底面積：38.8m×17.8m）から構成されており、両池の高低差は1.3mである。集水域から導かれた濁水は流入管を通過して、まず沈砂池に入り、水位の上昇に伴って、浸透池までその貯水範囲がおよぶ構造になっている。また、流入管の出口付近に越流堰（幅：5.5m、高さ：0.5m、厚さ：0.3m）が設置されており、それを越えた濁水のみが沈砂池へ流入する機構になっている。なお、地下水位は、無降雨期において、沈砂池の池底から約11m下付近にある。

b) 実験方法と結果

各観測データは自記計測された。その計測間隔は無降雨時は1時間間隔、降雨後は降雨停止時から24時間は5分間隔であった。

浸透流量は流入流量に池内降雨量を加え貯水増加量を引いた値として、上記の観測データを次式に代入して求められた。

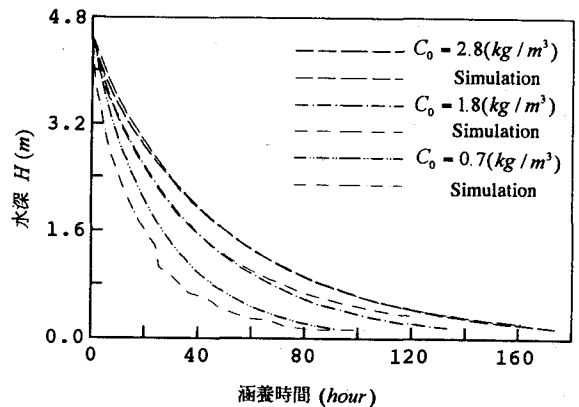


図4 初期涵養サイクルのモデル実験とシミュレーション

$$F(t) = Q_{in}(t) + AR(t) - \Delta S(t) \quad (16)$$

ここに、 $F(t)$: 浸透流量 (m^3/s)

$Q_{in}(t)$: 流入流量 (m^3/s) (越流水深を越流堰の式に適用して換算)

A : 実験池の面積 ($74m \times 74m$)

$R(t)$: 雨量強度 (m/s)

$\Delta S(t)$: 貯留量の変化量 (m^3/s) (沈砂池水深から換算)

以上から算出した浸透流量と降雨強度の一例を図6に示した。

さらに、濁水が沈砂池へ流入しはじめた時刻を開始時刻として1時間隔で、12時間連続採水し、SSが測定された。実際には、昭和63年度は4回、平成2年度は11回、平成3年度は13回測定された。実験池への流入量と池底からの流出量測定のために、図5の黒長丸で示した位置で、沈砂池水位と越流水位が観測された。また、沈砂池の中央部において地下水位を、浸透池施設の隣接位置で降雨量がそれぞれ観測された。沈砂池の水位の経時変化を図7に示した。同図では作図の都合で各涵養サイクルの間の時間は省略されている。

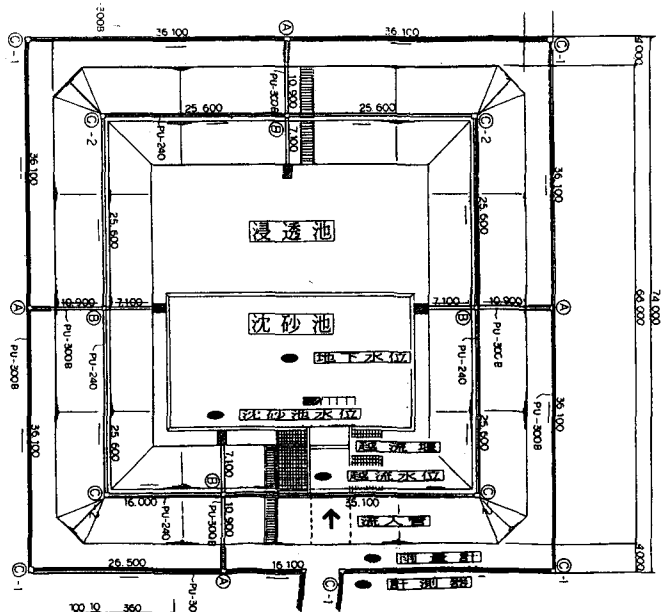


図5 実験池の概要

5. 2 シミュレーション

a) 係数の決定

実験に合わせたシミュレーションを行なうためには、式(15)中の K_0, γ, R を決定しておく必要がある。底層の浸透係数 K_0 は初期の、すなわちまだ目詰が生じていない時の底層の浸透係数であり、初期涵養サイクルの最初の水位減少速度から次式によって計算されるはずである。

$$\frac{dH}{dt} \Big|_{t=0} = -K_0 H \quad \text{or} \quad K_0 = -\frac{1}{H} \frac{dH}{dt} \Big|_{t=0}$$

(17)

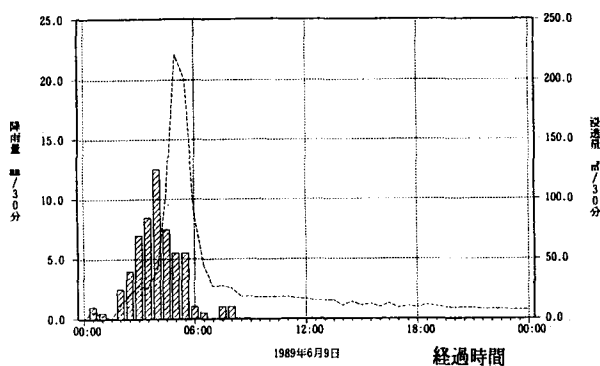


図6 実験池における降雨強度と浸透流量

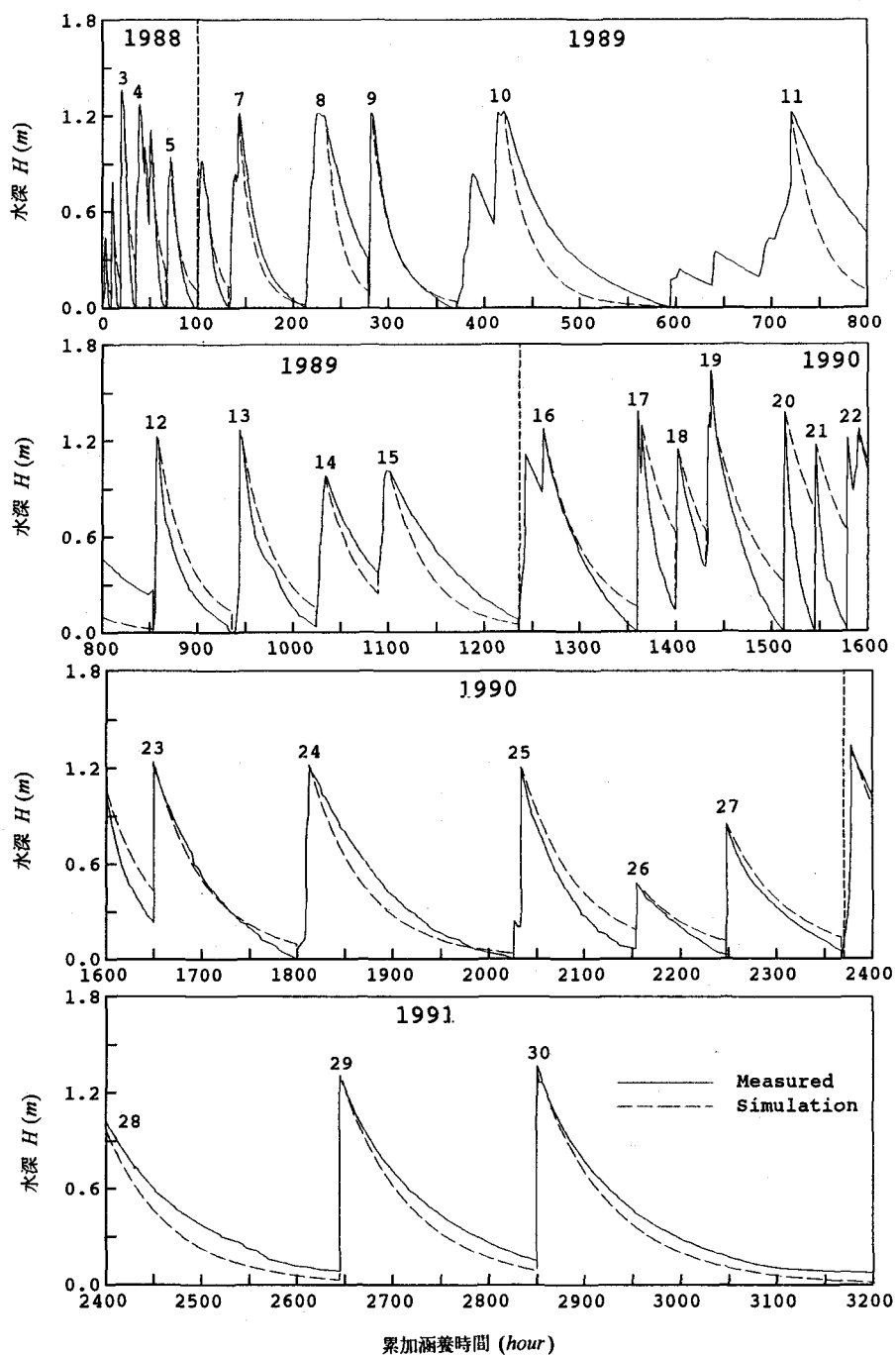


図7 実証実験の水位降下と長期涵養サイクルのシミュレーション結果

各涵養サイクルの降下部のみ計算した。また、作図の都合で各涵養サイクル間の空池期間は省略して示した。縦の破線は年の境界を示している。

しかし、初期涵養サイクルの最初にはいくらかの懸濁粒子が底層へ侵入するため、上式で K_0 を求めると過大になる²⁾。式(1)では K_0 はまったく目詰のない状態での値として定義されているが、ここでは初期涵養サイクル全体を通して最適の K_0 を試行によって求めた。

次に、実験の各涵養サイクルでケーキと底層の合成浸透係数 K_n の最適値（式(11)を用いて計算した水面降下と実験の各涵養サイクルでの水面降下とが最も良く一致する K_n の値、ただし $\alpha = 10^4 \text{ (m}^2\text{s/kg)}$ を用いた）を試行によって求めた。これを K_n^E で表わす。そして、単位底面積当たりの累加ケーキ質量 M_n （各涵養サイクルでの懸濁物質濃度と浸透水量との積の和を池の底面積で割って求めた）と K_n^E との関係

を図8に示した。この図から分かるように K_n^E の値は M_n の増加とともに減少する傾向を示している。しかし、所々で滑らかな減少曲線から上の方へ飛び上がるような変化を示しているところがある。これらの飛び上りの前には長期間の底面乾燥が認められことから、これはケーキのひび割れによる透水能の増加のためと考えられる（写真1参照）。一方、ケーキと底層の合成浸透係数はケーキの収縮、圧密、ひび割れを無視すると、式(13)で求められる。これを図8に示した（ K_n^A ）。この図から分かるように、 K_n^A の方が K_n^E の飛び上りを除いたものより若干大きな値を示している。そこで、 K_n^B と K_n^E の飛び上りを除いたものが最も良く一致するように式(15)の γ を 1.3 と求めた。

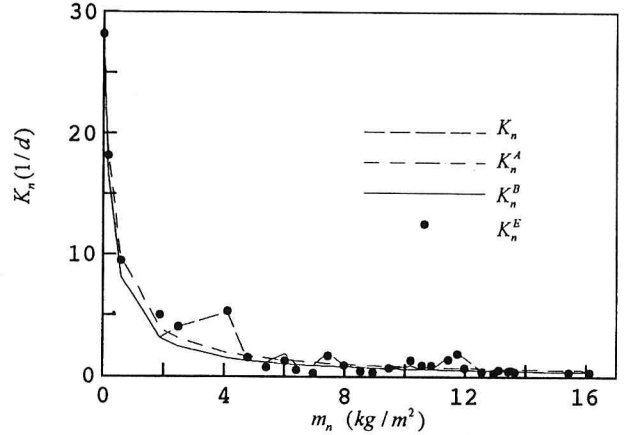


図8 種々の方法で求めた合成浸透係数

次に、式(15)よりひび割れによる透水能の増加係数の実験値 R_n^E を

$$R_n^E = \frac{1/K_n^E - 1/K_0}{\gamma \alpha M_n} \quad (18)$$

で求めた。また、ケーキの乾燥によるひび割れを表わす指標として、ひび割係数 ω_n を谷口等⁵⁾に習い

$$\omega_n = \frac{D_n(t_n - t_r)}{(1 + M_n)} \quad (19)$$

で定義する。ここで、 t_n は前回の涵養サイクルの終了（水深が0になった時点）からその涵養サイクルの始まるまでの日数（空池日数）。 t_r は空池期間中に 20 (mm) 以上の降雨の有った日数。 D_n は乾燥速度で谷口等⁵⁾によれば、

$$D_n = f_1(T_n)f_2(W_n)f_3(H_n) \quad (20)$$

で表わされる。ここで、

$$f_1(T_n) = 0.384 \times 10^{0.0231(T_n + 10)} - 0.017$$

$$f_2(W_n) = 0.4W_n^{1/3} + 0.42$$

$$f_3(H_n) = 100 - 100H_n$$

である。

ここで、 T_n, W_n, H_n は空池期間の平均の温度、風速、相対湿度である。これらの値は本池から約10km西方に位置する熊本气象台にて測定された値を用いた。

式(18)で求めた R_n^E と上記の ω_n との関係を図9に示した。さらに、 R_n と ω_n の関係を

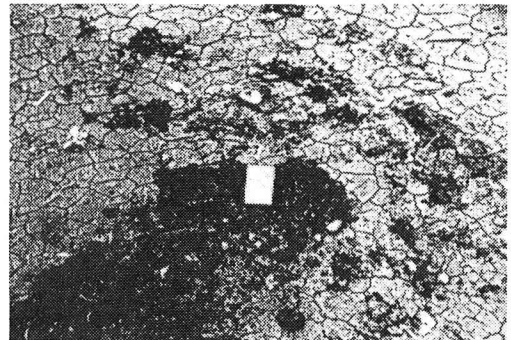


写真1 実験池におけるケーキの形成とひび割れ

$$R_n = 1 - \frac{1}{1.33 + \exp\{-0.63(\omega_n - 7)\}} \quad (21)$$

として近似し、この関係を同図に示した。同図から分かるように、実験で求めた R_n は式(22)によって良く近似される。

b) シミュレーション方法

各涵養サイクルの初期の水位、すなわち雨水浸透池への流入が終了した時点からの水位変動を式

(11)によって求めた。また、 K_n としては式(15)を用い、その中の R_n は式(21)で求めた。計算方法は、初期涵養サイクルの場合と同様である。

5. 3 比較検討

上記の方法で計算した各涵養サイクルの水面の経時的降下を図7に示した。この図から、涵養サイクル10, 11, 17, 20, 21 では計算結果は実験結果と若干はずれているが、その他のサイクルではほぼ一致していることが分かる。

6. 考察

図4は初期涵養サイクルでは、底層の浸透係数 K_0 と懸濁粒子の比抵抗を求めることができれば、これに基づいてシミュレーションを行うことにより、ほぼ完全に水位低下を予測できることを示している。懸濁粒子の比抵抗は Ruth¹⁾ の低圧ろ過実験と同様な試験により求めることができることが分かっている²⁾。また、底層の浸透係数は施設を建設する地点にて測定可能と考えられる。従って初期涵養サイクルに関しては雨水浸透池の水位降下は本モデルによって予測可能といえる。

長期涵養サイクルについては、実験で求めた比抵抗²⁾から予測された浸透係数、すなわち式(12)の K_n^* は実証実験で求めた K_n^E より若干大きめの値となっている(図8)。これはケーキの収縮や圧密によるものと考えられる。ここではこの効果を $\gamma=1.3$ とすることによって補正した。この補正係数は懸濁粒子の特性と考えられるので、実際には実験によって事前に求めておく必要がある。これによって補正した値より実証実験の値は所々で大きくなっている。これは写真1からわかるように乾燥によるケーキのひび割れによるものと考えられる。これについてはひび割れによる K_n の増加を R_n によって補正した。さらに、 R_n と谷口らのひび割れ係数 ω_n の関係を調べると、図9に示したように一定の ω_n までは R_n は変化せず一定で、ある一定の ω_n を越えると急に R_n が減少する。これは、乾燥がある一定値を越えると一気にひび割れが生じ、それによる浸透能も一気に増加するものと考えられる。この R_n は図9に示したとおり、式(22)によってよく近似される。この関係も懸濁粒子の特性と考えられるので事前に実験によって求めておく必要がある。しかし、ひび割れによる浸透能の上昇はさほど小さくなく、またこれを無視しても安全側の予測となるので、これについては必ずしも十分に検討する必要はないと考えられる。

7. 結論

以上により次のような結論が得られる。

(1) 目録を伴う初期涵養サイクルの水面降下は、底面の浸透係数、懸濁物質の浸透比抵抗、懸濁物質の初期濃度を求めることにより、3. 1で述べた方法で十分シミュレートできる。

(2) 長期間にわたる涵養サイクルの水面降下は式(15)の K_n を式(3)の K_0 に代入することによって初

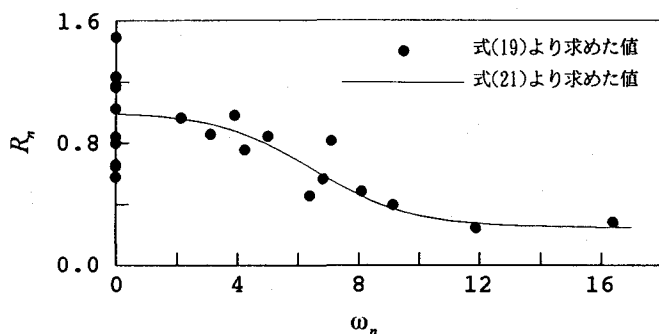


図9 R_n と ω_n の関係

期涵養サイクルの場合と同様にシミュレートできる。

(3) 長期間にわたる涵養サイクルでは、ケーキの圧密収縮、ひび割が生じるため、圧密収縮による浸透能の減少係数 γ 、ひび割による浸透能の変化係数 R_n を求めなければならないが、クロボクの場合、 $\gamma=1.3$ 、 R_n は式(22)によって表わすことができた。

(4) 上記の係数を用いることにより(2)の方法で実験池の水面降下をほぼ満足できる程度にシミュレートできた。

従って本モデルは十分実用に耐え得るものと考えられる。

謝辞

実験池のデータは熊本県より頂いたことを付記し感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Ruth B.F.: Studies infiltration 3, Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 27, No. 6, 708-723, 1935.
- 2) Hetai, Yamasaki K., Tutumi A.: Experimental Study on Seepage Impedance by Dynamic Clogging, 福岡大学工学集報, 第 51 号, (1993)
- 3) Yamasaki K., Onish K.: Infiltration of Water to the Ground in Flood Control Reservoir with Seepage, Sediment Transport Modeling, Proceeding of the International Symposium, 813-818, ASCE, New Orleans, Louisiana, (1989)
- 4) 土木学会: 衛生工学実験指導書(プロセス編), 12-14, 昭和61年
- 5) 谷口尚弘、伊東三夫: 自然条件を利用した下水汚泥の処理技術に関する調査、日本下水道事業団技術開発部資料、ISSN-911, (1986)