

不圧透水層内の自由水面の周期的挙動と貯留率、拡散係数に関する実験 Laboratory Studies on the Storativity, the Diffusivity and the Periodic Fluctuations in Phreatic Aquifer.

山口大学工学部 正員 深田 三 夫
 長崎大学工学部 正員 武 政 剛 弘

要旨： 鉛直砂柱を用いた実験によって、砂層内の自由水面の変動に伴う貯留率の高さ方向の変化、時間的变化を調べた。さらに水平砂層を用いた非定常実験を行ない、他端に与えた水位の周期的変動が砂層内に伝達していく際に自由水面上部の貯留率の変化が伝達速度に大きく影響を与えていることを確めた。

1, はじめに

透水層内に自由水面が存在する、いわゆる不圧浸透流の問題には、従来より流れはほとんど水平方向で、静水圧分布が成立するとするDupuit- Forshheimerの準一様流の仮定と、流れは飽和領域のみに限り不飽和領域の水の挙動は無視することを大きな仮定とした解析がなされている。海岸地下水の問題に代表されるような非定常問題においても上の仮定と Darcyの式を基礎にした解析がなされていることはいうまでもない。多くの実際的な問題がこの方法によって説明できるが、最近水文学の分野において、特に地表流発生メカニズムの問題と関連して透水層内の自由水面の挙動について注目されている。それによると地下水面が浅い不飽和な土地に雨水、または側方浸透流により水の供給がある時に、きわめて短時間のうちに自由水面が応答、上昇し地表流が発生することが現地での観測、または室内実験の面から報告されている。⁽¹⁾ この応答性は自由水面上部の毛管張力帯が地表面に到達している場合には更に速くなる。この原因については雨水浸透に伴う湿潤前線 (wetting- front) 直下の間けき空気圧の増加とする考えと、自由水面が地表に近づくにつれ層の貯留率が低下するためという考えがある。著者らは二次元水平砂層を用いた実験により、砂層他端に与えた周期的水位変動が Dupuit- Forshheimerの準線形理論が教えるよりも速い速度で砂層内に伝達していくことを気づいた。⁽²⁾ 特にその差異は砂の粒径が小さいほど顕著であった。これらのことから透水層内の自由水面の挙動はその上部の毛管張力帯を含む不飽和領域での水の流入出、すなわち貯留係数を知ることが重要と考え、まず鉛直砂柱を用いた実験により貯留係数を直接測定することを試みた。次に水平砂層による非定常実験のデータを解析し、水平砂層における準線形理論の適用性について考察を行なった。

2, 貯留係数について

Todd (1959)⁽⁵⁾ によれば、不圧透水層内の貯留率 (specific yield) は単位面積あたり、単位の水面上降が生じた時に、単位体積の透水層からの排水量とされている。一般に地下水面が深く、土中水が平衡している状態では自由水面上部の保水曲線は図- 1に示すような形状をしているが、自由水面が上下するような非定常現象の場合には、その変動の周期が短かければ有効空けき内の $(n-c)$ のすべての水が重力排水されるわけではない。したがって貯留率は排水時間の関数であるといえる。また毛管張力帯が地表に届いているような、地下水面が浅い場合には、ほとんど飽和であるために貯留率は極端に低くなることが推測できる。したがって自由水面位置の関数でもある。以上のことを図1に示す記号を使

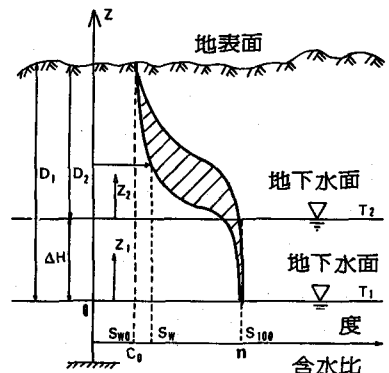


図1 土中水分曲線の変化

い貯留係数を次のように定義する。時間 t_2-t_1 により dh の水面降下があった時に単位面積を通しての排水量 dW_d は

$$\Delta W_d = n d h + \int_{t_2=0}^{t_2} n s_{w_2}(z_2, t_2) dz_2 - \int_{t_1=0}^{t_1} n s_{w_1}(z_1, t_1) dz_1 \quad (1)$$

貯留係数 β は単位体積の透水層からの排水量として次のように定義する。

$$\beta = \beta(z_1, z_2, t_1, t_2) = \Delta W_d / d h \quad (2)$$

保水曲線が相似で、自由水面が十分に深い場合には $\beta = n - C_0$ となる。

3. 実験装置と測定方法について

装置は図2に示すように、砂柱内の任意の高さで自由水面をつくることができるようにしてある。(初期水位 H_2) 下端を検定済みのガラス製マンノメーターに接続し、途中にバルブ2を設ける。マンノメーターは一定水位 h_1 に保っておく。砂柱内、およびマンノメーターの水位変化は圧力端子を挿入し、差圧変換器より電気信号に変え記録紙より読みとる方法(方法1)と、砂柱側壁に開けた小孔より水の浸出する瞬間を追いつその時点で自由水面が通過したとする方法(方法2)にて行なった。方法1では砂柱内の静水圧近似が充分とれるようにバルブの開

閉は緩やかに行ない、圧力端子も自由水面直下に挿入した。まず初期水位を一定 h_1, H_1 に保ち、バルブ1を開放し重力排水を行なう。一定の経過時間後 (ΔT) にバルブ1を閉め、バルブ2をひらく。記録紙上の水位変化曲線は右に示したような形状をとるが、この場合に水位変動幅 ΔH による平均の貯留係数と任意の自由水面高さでの貯留係数は先の定義にしたがうと、

$$\bar{\beta} = \beta(H_1, H_2, \Delta T) = \frac{A_m \Delta h}{A_s \Delta H} \quad (3)$$

$$\beta_H = \beta(H_1, H_1, \Delta T) = \frac{A_m \Delta h'}{A_s \Delta H'}$$

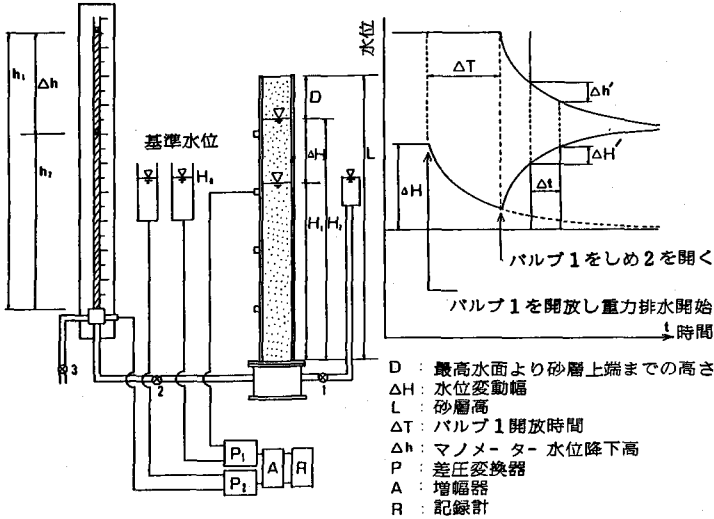


図2 貯留係数測定装置概略図

表1 実験に用いた試料の物理特性

No	λ 空けき率	G_s 真比重	d_{10} (cm)	$U_c = d_{90}/d_{10}$
1	0.457	2.69	0.110	1.210
2	0.440	2.64	0.053	1.566
3	0.480	2.74	0.030	1.895
4	0.462	2.62	0.034	1.529
5	0.485	2.81	0.010	2.990
6	0.437	2.54	0.082	1.232
7	0.410	2.55	0.033	1.242

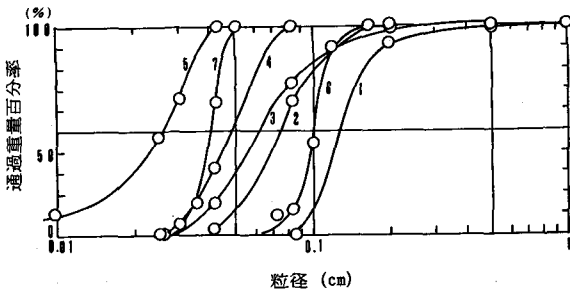


図3 試料の粒径加積曲線

ここに、 A_m A_s はそれぞれマンノメーターと砂柱の断面積を表わす。また実験に用いた試料の粒径加積曲線と物理定数はそれぞれ図3、表1にまとめている。No.1～5の試料については方法2を用い、自由水面が充分深い場合を想定して行なわれNo.6～7の試料は自由水面が浅く、表面含水比が大きい場合を想定し方法1にて行なわれた。期間中の水温は16℃～19℃であった(水道水)。

4. 実験結果について

まず重力排水時間 ΔT を変化させることによって、No.6～7の砂について求めた β の値が図5-1に示されている。同一の砂でありながら、初期自由水面位置 H_1 が異なれば β も違ってくる。しかし排水時間依存性については顕著な相違は測定されず漸増しているにすぎない。これは砂質土の場合には、少なくともこの実験で与えられた水位変動幅では数十秒で排水を完了するためと考えられる。同様な結果がNo.2～5の試料についても得られている(図5-2)ただしNo.5の試料については、排水時間の減少とともにやや急に落ちていくことがわかる。これはNo.5の試料が粒径曲線が示すように、ややシルト質のもので

あり、排水開始30分後に測定された高さ方向の含水比曲線(図4)をみても砂質土とは異なったプロファイルを示すことからもうかがえる。一般に砂質土の水分プロファイルは図4に代表されるように、毛管水帯の上部で急激な変化を示すのが特徴であるが、粘土質ではそうでない。貯留係数の点からも砂質土と粘土では異なった傾向を示す。一方、高さによる貯留係数 β_H の違いを調べた結果が図6-1、6-2に示されている。図6-1は特に自由水面が浅い場合について調べたものであり、排水40秒後と30分後のデータは先の結果からも明かなように、経過時間による差異は明確でないが初期自由水面位置 H_1 のちがいや、変動幅 ΔH によって顕著な差がみられる。この場合、毛管上昇高さ h_c を次式によって求

$$h_c = 0.45(1-n)/nd_{10}$$

めると、No.7の試料については約20cm

No.6の試料については約7cmである。したがって毛管帯の中で変動を繰り返す場合には貯留係数は極端に低い値をとり、しかも高さ方向の変化は緩やかである。図6-2はいったん砂層上端まで飽和させた後($H_2=70$ cm)、70cm下端にて重力排水($H_1=0$ cm)した場合の高さ方向の貯留係数の変化である。

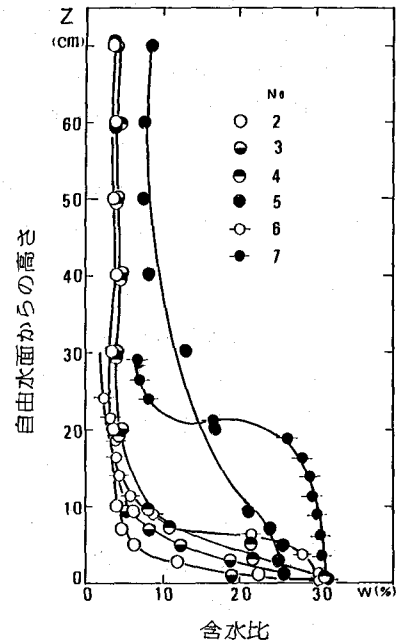


図4 自由水面 ($Z=0$) 上の含水比

	d_{10} (cm)	ΔH (cm)	D (cm)
○	0.033	17.0	4.0
●	-	7.5	29.5
▽	0.082	5.4	2.1
▼	-	4.3	16.7
■	-	10.0	11.0

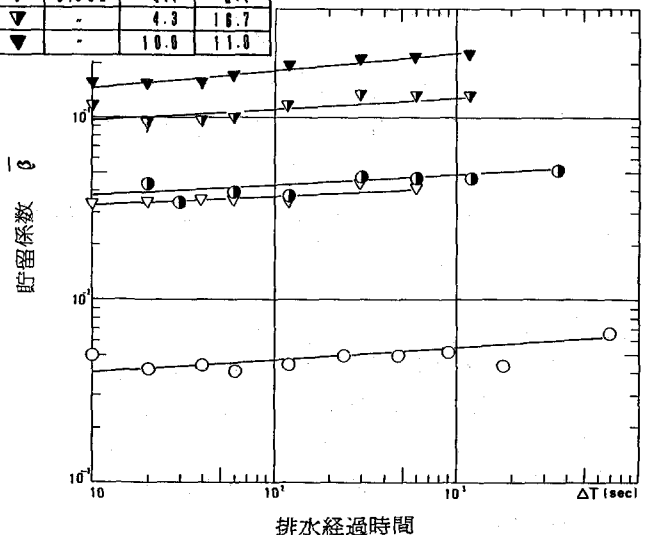


図5-1 排水経過時間と貯留係数 (No.6, 7)

No. 5 の試料を除いて自由水面上 / 0 cm 以上ではほぼ一定な値をとり、これが有効空けき率の値をとっている。しかし自由水面上 / 0 cm 以内では極端に小さくなる。いずれの場合も毛管上昇高さ以内では貯留係数は有効空けき率の数%にすぎない。たとえばNo. 7 のデータについて言えば、高さ約 / 0 cm の間の貯留係数が排水時間に関係なく約 5×10^{-3} すなわち単位面積あたり 0.5 mm の水を加えただけで / 0 cm の自由水面上昇高が得られることになる。

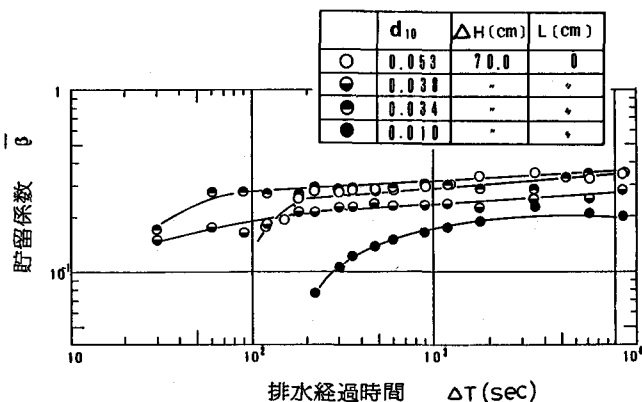


図 5-2 排水時間と貯留係数 (No. 2 ~ 5)

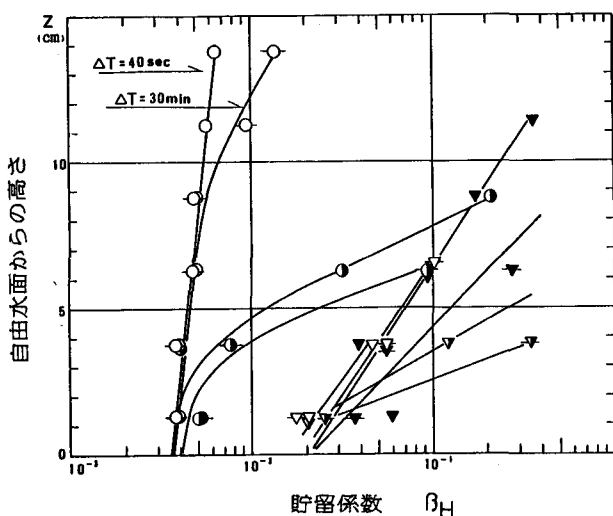


図 6-1 排水経過時間のちがいによる貯留係数の深さ方向の変化

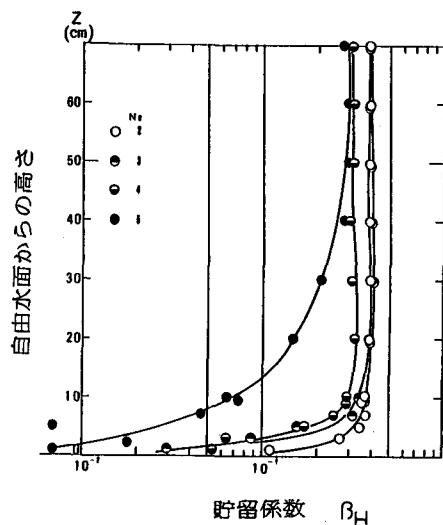


図 6-2 貯留係数と高さとの関係 (30 分後)

5. 不圧透水層内の自由水面の周期的挙動に関する準線形理論 (二次元砂model)

図 7 に示すように水平な不透水性基盤上に存在する、不圧地下水層の他端にて周期的な水位変動を与えた時に、層内の水位変動は Darcy の式と Dupuit-Forchheimer の準一様流の仮定を基礎にした拡散型の偏微分方程式で示され、透水帯内部に変動の振幅を減衰させながら、かつ位相の遅れを伴いながら伝達していく。図 7 の記号を用い、次の無次元量を選ぶと水位変動を表わす方程式と境界条件は、次のようになる。

$$h' = h/H \quad T' = tKH/\beta L_s^2 \quad x' = x/L_s \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x'} \left(h' \frac{\partial h'}{\partial x'} \right) &= \frac{\partial h'}{\partial T'} \\ h'_{x'=0} &= 1 + \cos \Gamma T' \quad h'_{x'=1} = 1 \quad \Gamma = \frac{2\pi\beta}{TKH} \quad h'_0 = \frac{h_0}{H} \end{aligned} \right\} (5)$$

この方程式は非線形であるが、2. 3の線形近似方法を用い⁽⁶⁾、また透水層の貯留係数は場所的、時間的に一定であるとし、解析解を求めることができる。解は煩雑であるので複素形式で記述すると、

$$h'^2(x',T')=1+\frac{1}{2}h_0'^2+2h_0'\left|\frac{\sinh(1+i)ax'}{\sinh(1+i)a_1}\right|\cos(\Gamma T'+\varphi_1)-\frac{1}{2}h_0'\left|\frac{\sinh(1+i)ax'}{\sinh(1+i)a_2}\right|\cos(\Gamma T'+\varphi_2) \tag{6}$$

$$a_1=\left(\frac{\pi\beta}{TKH}\right)^{\frac{1}{2}} \quad a_2=\left(\frac{2\pi\beta}{KTH}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \varphi_1=\arg\left\{\frac{\sinh(1+i)a_1x'}{\sinh(1+i)a_1}\right\} \quad \varphi_2=\arg\left\{\frac{\sinh(1+i)a_2x'}{\sinh(1+i)a_2}\right\}$$

Γ が充分に大きく、しかも変動の振幅 h_0' が $\ll 1$ の場合、(すなわち透水層が深さに比べ水平方向に充分長く、しかも透水性が低い場合など) 上式はよく知られた減衰振動解となる。

$$h'=1+h_0'\exp(-a_1L_sx')\cos(\Gamma T'-a_1L_sx') \tag{7}$$

この式の表わす、際立った特徴は、透水層内での水位の変動幅の減衰比、もしくは位相の遅れを測定すれば透水層の定数、すなわち拡散係数 を知ることができることである。

$$\frac{\beta L_s}{TKH}=\left[\frac{\ln h_1'-\ln h_2'}{(x_2-x_1)}\right]^2 \tag{8}$$

もし、貯留係数 β を知ることができるならば、逆に上式より透水係数 K を求めることができる。実際に著者の一人は現場測定 of データをもとに、揚水試験で得られた貯留係数の値を用い、検討した結果(7)が使えることを確めた。ところで、(7)式を導く過程でつかわれた3, 4の仮にも拘らず、二次元室内砂モデルで実験を行なうと透水層内の水位変動は(7)で充分近似できることがわかる。ただし、減衰定数をその実験条件に応じて定めた場合であって、定水位透水試験で求められた透水係数や、有効空げき率を用いては実験結果を説明できない。このことを以下にみてる。図8は無次元距離 h' と振幅比との関係を示したものであるが、約透水層の半分までは充分 (7)に従っていることがわかる。このデータをもとに (8)式を用い、貯留率としては有効空げき率を使い、逆に透水係数を算定すると、定水位透水試験で得られた値より一桁以上も大きな値が得られる ($d=0.033\text{cm}$)。この理由としては砂モデルによる実験がほとんど砂層高50cm前後で行なわれ、自由水面上部の毛管張力帯が砂層上端まで達しており、しかも水位の変動幅が数cmの場合が多いためである。この場合には先の鉛直砂柱実験でわかったように砂層の貯留係数は極端に低く、かつ高さ方向に一定とみなせるからである。砂層内の水位変動振幅の減衰比が (8)式に従うことに着目し、逆にそれから貯留係数の値を求めたのが図9と図10に示してある。ただしこの場合透水係数は定水位試験での値を用いた。(実験を通じて粒径レイノルズ数は1以下であったので慣性項の影響は無視してよい) 前述の図5-1に較べて周期への依存性が強く、振動比との関連が薄い。周期が短い時

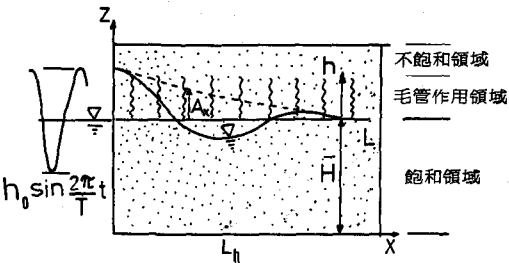


図7 水平砂層内への水位変動の伝達

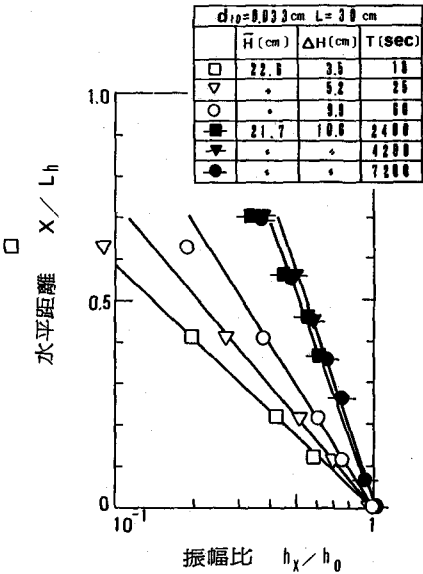


図8 振幅比と水平距離との関係

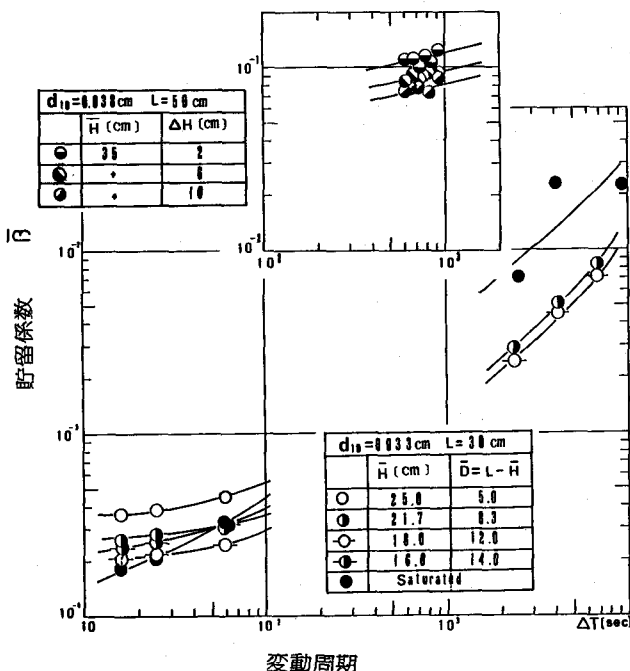


図9 変動周期と貯留係数 (水平砂層による実験)

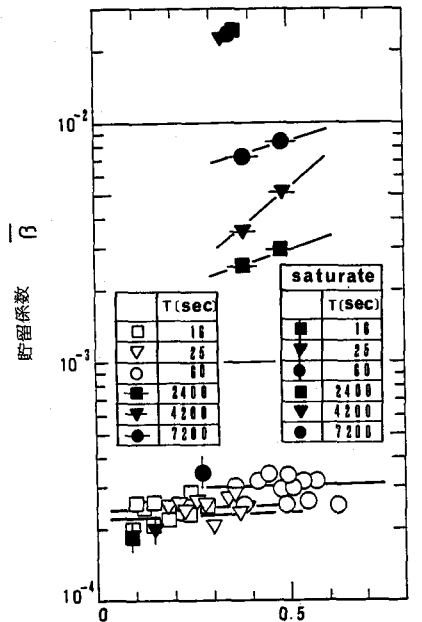


図10 変動振幅と貯留係数 (水平砂層)

には、鉛直砂柱実験にて求めた貯留係数の値よりも、更に一桁も小さい値が得られているが、この差異については明らかでない。しかし、変動周期および自由水面位置に応じた貯留係数を定めれば、透水層内の水位の挙動は説明できる。

6. むすび

鉛直砂柱による貯留係数の直接測定、および水平砂層による非定常実験の結果、次のことがわかった。
1, 砂質土の貯留係数は自由水面の位置とその変動幅に大きく依存し、特に砂層上面に毛管張力帯が達しており、その変動幅がその砂層の毛管上昇高さ以内であれば、その平均貯留率は自由水面が充分深い場合の数%程度である。重力排水時間への依存性はそれほど顕著でなく、時間とともに漸増していく。
2, 水平砂層において他端に与えた水位変動が内部に伝達していく場合、平均自由水面位置、変動周期に応じた貯留係数を与えれば、準線形理論が使える。ただしこの場合の貯留係数は鉛直砂柱実験にて求めた値とは異なる。

最後に、本実験にたいして有益な助言をいただいた山口大学工学部斎藤隆教授、長崎大学工学部古本勝弘助教授に深謝致します。

参考文献

- (1) Freeze, R. A. Streamflow Generation, Rev. Geophys, Space Phys, 12, 627- 647, 1974
- (2) Gillham, R. W. The Capillary fringe and its effect on watertable Response. J. Hydrol, 67 307- 324, 1984
- (4) Abdul, A. S. and R. W. Gillham Laboratory Studies of the effects of the Capillary Fringe on Streamflow Generation, Water Resour, Res. 20, no, 6 691- 6 98 1984
- (4) 武政, 古本, 藤川, 河野. 自由地下水層の透水係数に関する一考察, 長崎大学工学部研究報告, 14巻, 23号, 1984
- (5) Todd, D. K. Groundwater Hydrology (6) Noutsopoulos, G, J. the Hydraulics Div, ASCE, 1984