

# 粘性土における間隙水圧と流速の平衡化 プロセスに関する実験的研究

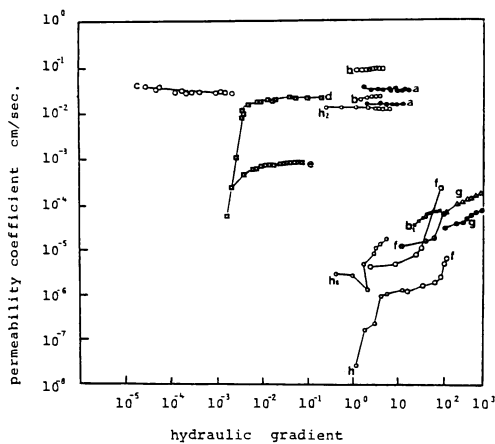
Experimental Study on Stabilization Process of Pore Water  
Pressure and Flow Velocity in Clayey Soil

雷 沛 豊\*・田瀬 則雄\*\*

Pei-feng LEI and Norio TASE

## I はじめに

シルトのような粘性土の存在は、地下水循環に対して重要な役割を果している。砂と礫層を透水層 (aquifer) と見なすことに対して、粘性土層を難透水層 (aquiclude) と見なす。第1図に示すよ



第1図 既往の室内実験で示される透水係数と動水勾配の関係。(木村, 1972)

a: Darcy, (gravely sand); b, b<sub>1</sub>: King, (sand and sand stone); c: Meinzer and Fishel, (sand), d: Kimura, (sand); e: Nagada, (clay), f: Tada, (loam); g: Lutz and Kempeer, (bentonite); h, h<sub>1</sub>, h<sub>2</sub>: Sato, (clay, silt, fine sand)

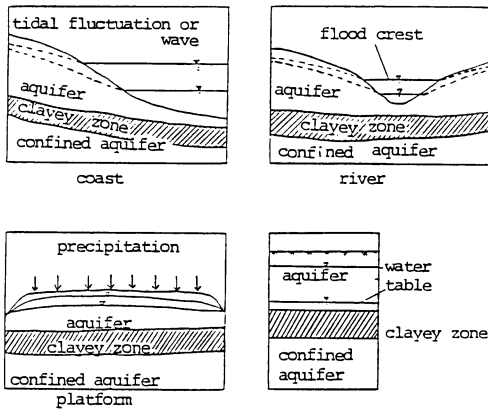
うに、砂のような多孔質媒体中を水が移動する場合、見掛け上の透水係数はほとんど定数で、ダルシー法則に従う。それに対して、粘性土と粘土の場合、透水係数は定数にならず、動水勾配によって変化する。

動水勾配の変化は、透水媒体におけるポテンシャル差の変化である。定常状態では、つまり透水媒体における各点での水圧、流速、流向の時間による変化がない場合では、そのポテンシャル差の大きさは地質、地形、含水媒体の性状などの因子によって決められる。地層に加えた载荷の増減による地層の圧縮と膨脹、降水による地下水への涵養などが非定常状態つまり透水媒体における水圧、流速または流向が時間とともに変化するを引き起す。非定常状態から定常状態になるまでの全過程は、ここで平衡化プロセスと言うことにする。

従来の研究 (岩崎, 1974; 山口・村上, 1974; 村上, 1977) によると、粘性土にかかった荷重の瞬間的变化に対して、過剰間隙水圧の消失あるいは間隙水圧の平衡化プロセスがかなり長い時間がかかる。さらに平衡化プロセスの様子が土質あるいは粘性土の透水性によって異なる。または荷重端に近いほど、生じた過剰間隙水圧の値が大きい。排水端に近いほど、間隙水圧の平衡化プロセ

\* 筑波大学・院・環境科学研究科 \*\* 筑波大学地球科学系

(1985年7月20日受理)



第2図 水文地質モデル

スが短い。

帯水層にはさまれる場合、粘性土層は加圧層になる。村山ほか(1961, 1964)は地盤沈下の模倣実験を行ない、被圧地下水位の低下による加圧層内の間隙水圧の変化と地盤沈下量を測定した。結果として、被圧帯水層の水位を低下させる場合、間隙水圧の長い平衡化プロセスを示し、さらに水位低下時の平衡化プロセスと比べて、水位上昇時のそれはかなり短いことが指摘された。または Terzaghi の圧密理論を用いて実験中粘土層の圧密度を計算すると、算出した結果より、実測値の方が小さい。これについて、粘性土層の圧密係数  $C_v$  が一定ではないことに主たる原因があると言われた。

間隙水圧が安定しないうちに、粘性土層を流れる地下水の流速はどう変化するか。この問題は過去の研究から残されたままである。

本研究は室内浸透実験を行なうことにより、被圧地下水位が低下する場合、間隙水圧の平衡化プロセスとともに発生する流速の平衡化プロセスを調べることを目的とした。実験条件に対応できる水文地質モデルは第2図に示す。

## II 浸透実験

粘性土層における水位差ベクトルの方向はほとんど粘性土層に垂直である。従って、ここで行なった浸透実験は一次方向にのみ水圧変化するもの

とした。

### 1) 透水セル

浸透実験は第3図で示した装置を用いて行なった。その主な部分は透水セルで、内径8.4cmの塩ビパイプを15cm切り取って、透水セルの本体とした。土質試料を透水セルに詰めたと、セル両端に真ちゅう線綱とプラスチック製フィルタをつけた。

浸透実験を行なう時に、透水セルの壁と試料の間のすき間が水みちになり、実験結果に影響を及ぼすことを防ぐ必要がある。そのために、試料を詰める前に、サンドペーパーとやすりで透水セルの内壁をあらくした。

### 2) 測定装置

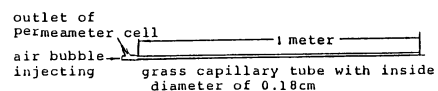
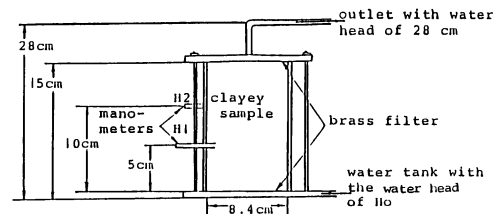
間隙水圧を測るために、水銀マンノメータを使った。内径2mmのポリエチレン細管を使ったので、13.6cmの間隙水圧の変化量を測るために、約0.01mlの水量が必要である。

透水セルの出口に流量計を接続した。流量計は直径1.8mm、長さ1mのガラス毛细管と気泡の注入口によって構成されている。

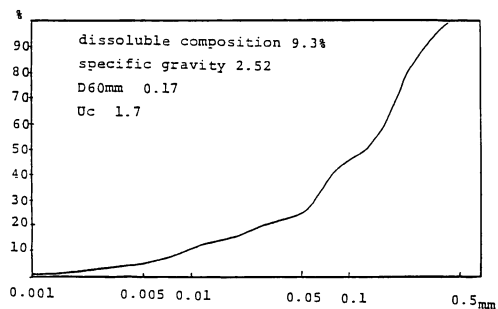
### 3) 土質試料

試料として、土浦市沖宿で採取した成田層の砂質シルトを使った。第4図に土質試料の粒径加積曲線と主な物理指標を示す。

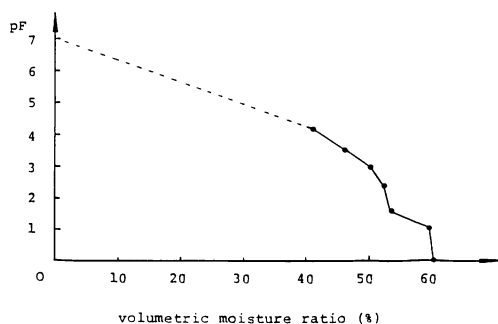
第5図は浸透実験が終わったあと、行なったpF試験の結果である。



第3図 実験装置



第4図 土質試料の粒径加積曲線



第5図 土質試料の水分特性曲線

#### 4) 実験手順とデータの処理

本実験は粒度分析専用の恒温室で行なった。実験温度は25℃に設定した。

セルの出口の水位は28cmに設定した。それが定水圧の帯水層と同じ役割を果すと考えた。水位の変化する被圧帯水層の代わりに、透水セルの入口に接続した水タンクの水位を変化させた。各実験での初期水位と水位変化幅は第1表に示す。

マンメータのないセルでの浸透実験結果と比較するために、45cmから304cmまで、水タンクの水位を上昇させる4つの実験で、マンメータを刺し込まなかった透水セルに同じ水タンクを接続した。それを使って、流出量だけを測定した。

マンメータの影響を定量的に評価するために、キャリブレーションを行なった。間隙水圧と流速ともに平衡状態になったあと、水タンクの水位を変化させないまま、マンメータから水を引き出した。それによって、ポリエチレン細管内の水銀柱と透水セルの間に圧力差を生じた。その圧力差のなくなる様子を観測した。このように得たデータを用いて、第6図に示したアルゴリズムでデータの処理を行なった。

### III 結果と考察

実験4と実験9における間隙水圧の経時変化曲線を第7図に示す。水タンクの水位が変わると、透水セルにおける各部分の間隙水圧はすぐに安定状態に達せず、平衡化プロセスが存在する。これらの曲線の後半の部分はほとんど水平的な直線になることによって、ある時間を経過したあと、透水セルにおける間隙水圧の時間に対する変化率はほとんどゼロであることがわかる。

間隙水圧の自然対数を取って、経過した時間と回帰分析を行なった。大体0.8から0.99の相関係数を有する。観測値を結ぶ曲線はその回帰分析の結果を示すものである。

透水セルにおける各通水断面から水の入口までの距離は、第2図のモデルにおける半加圧層内の

第1表 実験概要

No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
H <sub>0</sub>	280	225	171	139	87	54	42.5	35	45	84	129	189
DH	-55	-54	-32	-52	-33	-11.5	-7.5	10	39	45	60	115
DI	2.0	1.9	1.14	1.9	1.2	0.4	0.3	0.4	1.4	1.6	2.1	4.1
ET	2680	2760	4320	4890	4390	4270	7800	4420	3050	4170	6040	5670

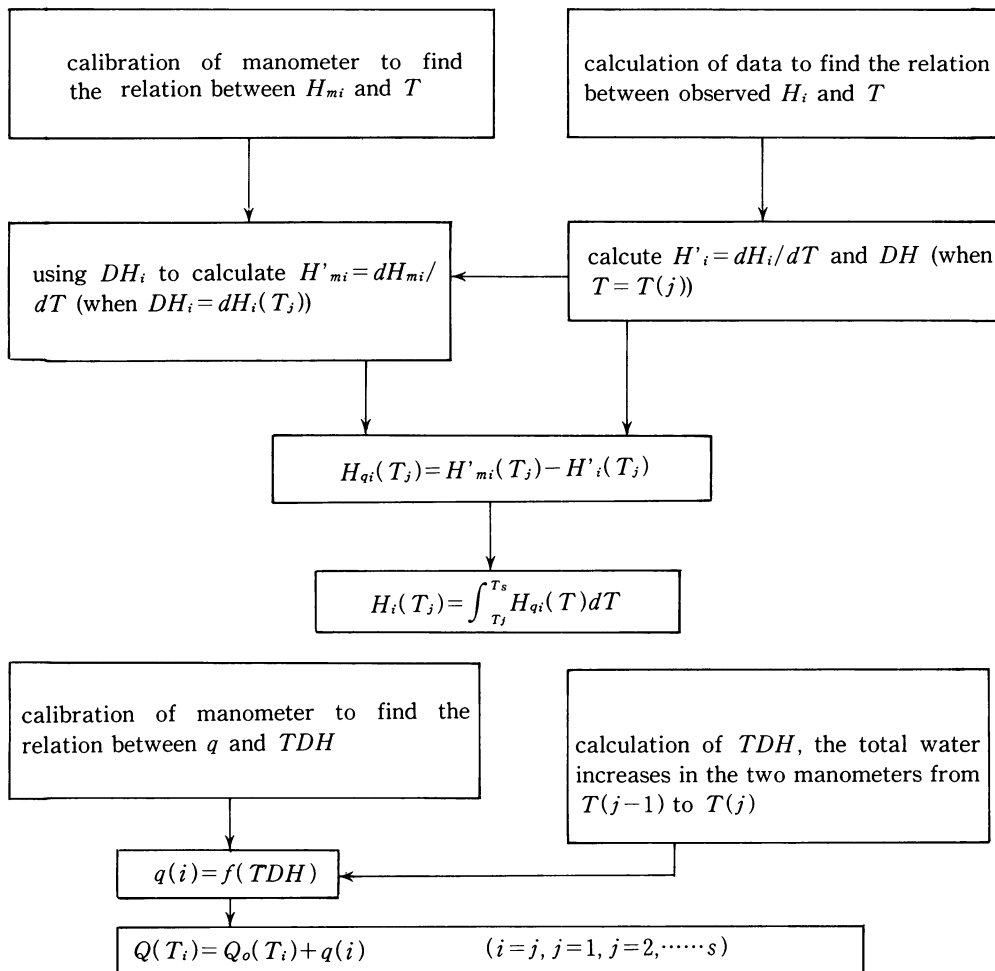
No : number of experiment

H<sub>0</sub> (cm) : initial water head

DH (cm) : increase on water head

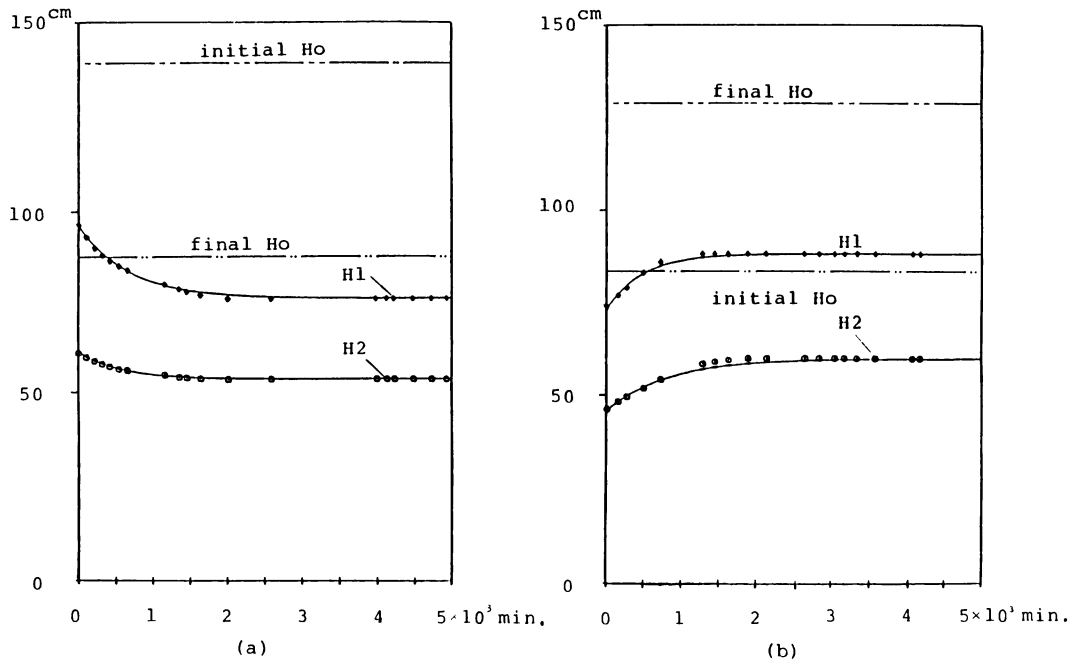
DI : absolute value of increase on hydraulic gradient

ET (min) : time that the experiment elapsed



- $H_{mi}$  : water head of manometer in calibration of them
- $H_i$  : water head of manometers in experiments
- $T$  : time (from 0 to s)
- $T_j$  : the elapsed when jth data was taken
- $DH_i$  : difference bewteen  $H_i(T_j)$  and  $H_i(T_s)$
- $H'_{mi}$  : the differential value of  $H_{mi}$  to  $T$
- $H'_i$  : the differential value of  $H_i$  to  $T$
- $H_{qi}$  : difference between  $H_{mi}$  and  $H_i$
- $TDH$  : total water head increases of the two manometers
- $q$  : water increased when the total increases of water head is  $TDH$
- $Q$  : corrected water quantity.
- $Q_o$  : observed water quantity.

第6図 データ処理のアルゴリズム



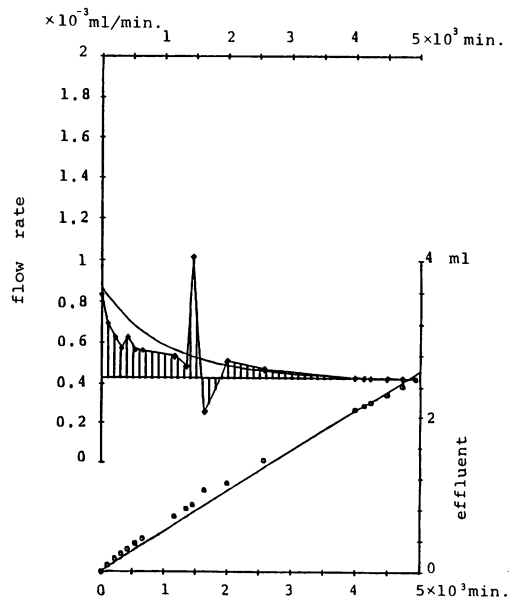
第7図 実験4と実験9における間隙水圧の経時変化曲線

各通水断面から水位変化した帯水層までの距離に対応している。セルの入口に近い部分の間隙水圧  $H_1$  は実験中の変化幅が遠い部分の間隙水圧  $H_2$  の変化幅より大きい。しかし、2本の曲線  $H_1$  と  $H_2$  はほぼ同時に曲線から直線になる。すなわち  $H_1$  と  $H_2$  の平衡化プロセスの長さはほぼ同じである。

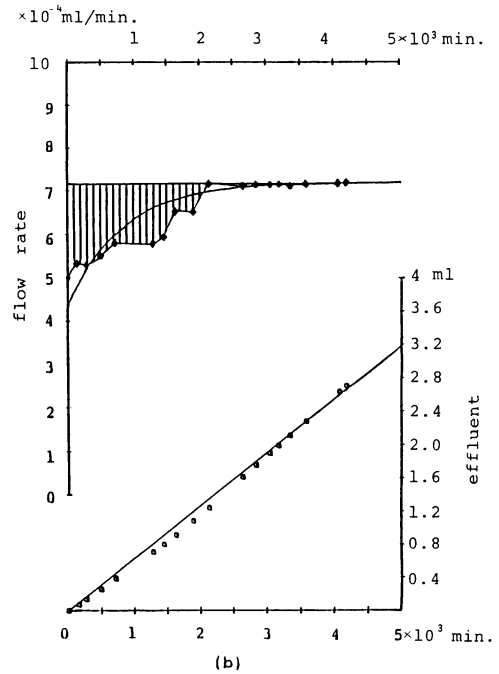
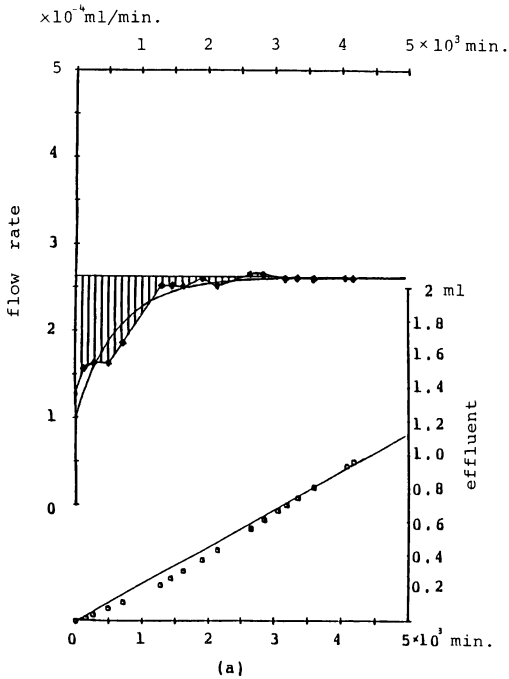
浸透実験に使った透水セルを三等分とすれば、 $H_1$  と  $H_2$  のある通水断面はそれぞれ二つの等分面と相当する。水の入口からこの二つの通水断面までの距離には倍ぐらいの差がある。 $H_0$  が変化するとき、この二つの通水断面での間隙水圧の変化幅にも倍ぐらいの差がある。しかし、この二つの通水断面の排水面からの距離は同じである。従って、間隙水圧の平衡化プロセスの長さは、主にその断面と排水面間の距離によって決められ、間隙水圧の変化幅などとは密接な関係はない。

実験4と実験9における流速の経時変化曲線を第8図と第9図に示す。水タンクの水位  $H_0$  を変化させると、透水セルを流れる水の流速もすぐに

安定状態とはならないで、平衡化プロセスを有する。流速の変化幅は大きいので、その変化する様



第8図 実験4における流速と流出量の経時変化曲線



第9図 実験9における流速と流出量の経時変化曲線

子がはっきり見られる。これに対して、時間によって全流出量の変化はほぼ直線的である。

しかし、水タンクの水位  $H_0$  が高い値から低い値へ変化する各実験で、実験開始から流速の平衡化プロセスが終るまでの間に、全流出量が回帰直線からのずれがあり、大体直線のやや上側にある。それに対して、 $H_0$  を上昇させる各実験では、実験開始から流速の平衡化プロセスが終わるまでの間の全流出量は回帰直線のやや下側にある。

流速観測値の自然対数と経過時間との回帰分析を行なった。流速観測値の間を通る曲線はその回帰分析の結果である。相関係数はすべて0.7以上であるが、間隙水圧の経時変化曲線と比べれば、流速—時間回帰曲線からのばらつきが大きい。その原因は流量計の精度にあると考えられる。流量計の精度は0.05mlであるが、その精度に相当する水量は、高い動水勾配のもとでは約1時間の流出量で、低い動水勾配のもとでは約6時間の流出量である。従って、その誤差を無視できるほどの精

度のデータを取りにくい。

図中の縦線を引いてある部分の面積は流出量差  $q_s$  である。つまり、各点の流速と安定流速との差を求め、その差に経過した時間をかけることによって算出した結果である。

$$q_s = \sum_{i=1}^s (V_i - V_s) \cdot \frac{1}{2} \cdot (T_{i+1} - T_{i-1})$$

さらに平衡化プロセスによる相対流出量差  $Q_s$  は次の式によって計算した。

$$Q_s = \left[ \sum_{i=1}^s (V_i - V_s) \cdot \frac{1}{2} \cdot (T_{i+1} - T_{i-1}) \right] / V_s \cdot T_s$$

ここで  $i$  は観測点の順番、 $s$  は安定状態になるまでの観測回数、 $V_i$  は  $i$  番目の流速観測値、 $V_s$  は安定したあとの流速値、 $T_i$  は水タンクの水位を変化させてから、 $i$  番目の観測値を取るまで経過した時間である。

算出した結果を表2に示した。すべての実験での初期水位  $H_0$  と相対流出量差  $Q_s$  とともに順位によって並び、スピアマンの順位による検定法で計

算すると、順位関係数は $-0.72$ で、 $2\%$ 水準で有意になる。さらに、 $Q_s$ の順位と実験中水タンクの水位変化幅のDHの順位を利用して計算すると、スピアマンの順位相関係数は $0.23$ で、 $20\%$ 水準でも有意にならない。要するに、水タンクの水位を変化させるとき、水位の変化幅よりも初期水位のほうが相対流出量差 $Q_s$ に対する影響が大きい。すなわち初期水位が低ければ低いほど、 $Q_s$ が大きくなる。

マンメータのない透水セルでの実験結果は第9図の(a)に示す。図(a)と図(b)の相似性によって、流速の平衡化プロセスの存在はマンメータの影響ではなく、間隙水圧の平衡化プロセスが存在すると同じように、粘性土の水理特性であると言える。

浸透実験のあと、同じ土浦市沖宿で採取した粘性土試料を用いて、圧密実験を行なった。第10図はその試験の結果を示す。これらの結果を利用して、各浸透実験における圧密現象の影響について検討を行なった。その結果を浸透実験の結果と一緒に表2に示す。

表2中の $T_{s1}$ と $T_{s2}$ はほとんど同じである。つまり間隙水圧 $H_1$ と $H_2$ はほとんど同時に平衡状

態になる。 $T_c$ は圧密試験の結果を用いて算出した圧密度が95パーセントになるまでにかかった時間である。 $Q_c$ は圧密試験のデータで算出した各実験での圧密効果による試料の体積変化量に相当する排水量である。 $Q_s$ は各実験中の全流出量である。

$T_c$ と $Q_c$ の計算はいずれもTerzaghiの圧密理論に基づいて行われた。つまり圧密方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

を

$$u(z, 0) = \frac{z}{2H} \Delta h \gamma_w$$

$$u(0, t) = 0$$

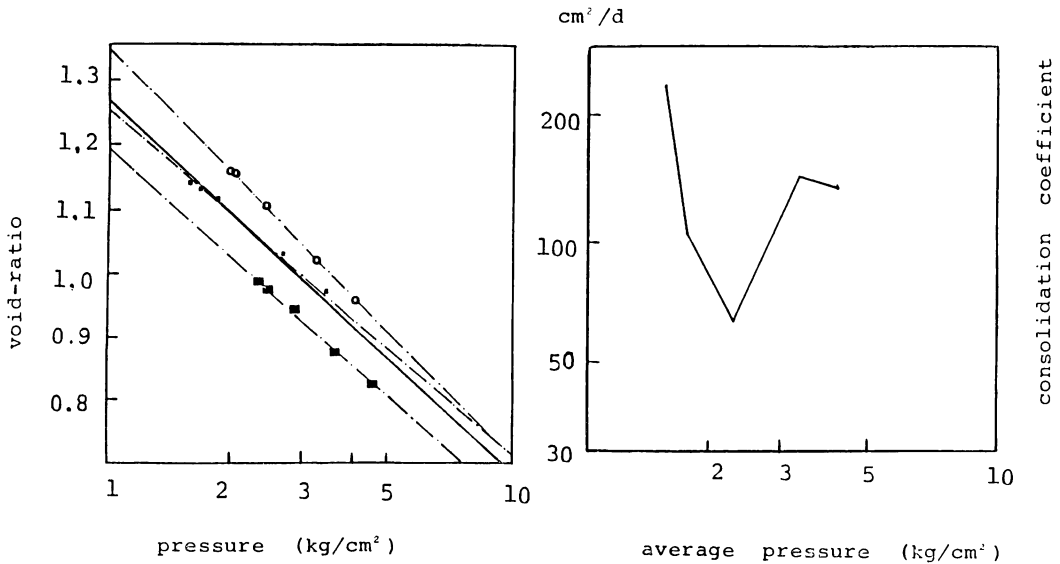
$$u(2H, t) = 0$$

のような条件のもとで解いた(村山ほか, 1961)。その結果は

$$U = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T_v}$$

$$M = \pi(2n+1)/2 \quad (n=1, 2, 3, \dots)$$

となる。



第10図 浸透実験の結果

表2  $H_0$ ,  $DH$ ,  $T_{s1}$ ,  $Q_s$ ,  $(Q_s)$ ,  $T_s$ ,  $Q_c$ ,  $Q_t$  との関係

$H_0$	280	225	171	139	87	54	42.5	35	45	84	129	189
$DH$	-55	-54	-32	-52	-33	-11.5	-7.5	10	39	45	60	115
$T_{s1}$	1100	450	2100	2000	1800	1500	2800	1200	1500	1300	3200	2000
$T_{s2}$	1100	300	2600	1500	1800	1500	2800	1300	1500	1300	3200	2000
$Q_s$	6.0	9.6	11.3	19.1	29.4	14.9	32.7	-12	-16.7	-17.3	-18.7	-12.6
$(Q_s)$									-28	-24.6	-26.8	-10.98
$T_c$	810	704	675	578	539	337	323	337	352	427	761	860
$Q_c$	2.49	2.52	1.56	2.56	1.63	0.62	0.42	-0.5	-1.78	-2.43	-2.88	-5.24
$Q_t$	2.4	2.2	3.6	2.1	1.63	0.33	0.32	0.5	0.75	1.4	4.4	7.5

$H_0$  (cm) : initial water head

$DH$  (cm) : increase on water head

$T_i$  (min) : time that stabilization process took

$Q_s$  : relative difference of effluent during the stabilization process

$$Q_s = \sum (V_i - V_s) \times 0.5 (T_{i+1} - T_{i-1}) / V_s T_s$$

$T_c$  (min) : time for 95% of consolidation, calculated with the result of consolidation experiment

$Q_c$  (min) : water increase caused by consolidation, calculated with the result of consolidation experiment

$Q_t$  (ml) : total effluent until steady state

ただし  $u$  : 間隙水圧,  $z$  : 粘性土層表面からの深さ,  $\gamma_w$  : 水の単位重量,  $C_v$  : 圧密係数,  $T_v$  : 時間係数,  $2H$  : 粘性土層の厚さ,  $\Delta h$  : 被圧地下水水位の変化幅,  $U$  : 平均圧密度である。

この式によって計算すると、圧密度が95パーセントになる時の時間係数  $T_v$  が1.4である。または、

$$T_v = C_v t / H^2$$

式に  $T_v=1.4$  を代入して、圧密度が95パーセントになるまでかかった時間  $T_c$  を算出した。

図10に示したように、間隙比  $e$  と圧力  $p$  の関係は次の式で表わすことができる。

$$e = 1.26 - 0.57 \log p$$

浸透実験中の  $H_0$  の1cm変化に相当する圧力の変化は  $1 \text{ g/cm}^2$  とした場合に、各実験での間隙量の変化つまり流出量の変化  $Q_c$  を求めた。

表2に示すように、ほとんどの実験では、 $Q_c$  が  $Q_t$  よりも大きい。いうまでもなく、第8図と第9図の中に縦線を引いてある部分、つまり流速平衡化プロセスの存在によって生じた流出量差  $q_s$  よりもはるかに大きい。または圧密試験の結果を利

用して計算した平衡化プロセスがかかった時間  $T_c$  は浸透実験中の  $T_{s1}$  と  $T_{s2}$  よりずっと小さいことが表2から分かった。従って、圧密現象の存在は間隙水圧と流速の平衡化プロセスの原因の一つであるが、圧密現象だけを用いて、平衡化プロセスのメカニズムを完全に解釈しきれないことが上述の結果から分かる。

#### IV おわりに

本報では粘性土における間隙水圧と流速の平衡化プロセスについて室内実験で検討してきた。得られた結論は次のとおりである。

(1) 水タンクを上下させ、動水勾配を変化させると、粘性土サンプルにおける間隙水圧はある時間を経てから平衡状態になる。なお、各通水断面で間隙水圧の平衡化プロセスの長さは、主にその断面と排水面の間の距離によって決められ、間隙水圧の変化幅等とは密接な関係はない。

(2) 水タンクの水位を変化させるときに、透水セルを流れる水の流速も不安定状態になり、その不安定状態の続く時間は間隙水圧の平衡化プロセスよりも長い。

(3) 流速の平衡化プロセスによる相対流出量差



$Q_0$  に対する影響は、水位変化幅より、初期水位のほうが大きい。被圧地下水位の上昇、下降の実験のいずれにおいても、初期水位が低ければ低いほど、相対流出量差は大きくなる。

(4) 浸透実験中、水位の変化による粘性土の圧密と膨脹が間隙水圧と流速の平衡化プロセスを引き起す原因と考えられるが、圧密試験の結果に基づいた計算値と実験結果との間に大きな差がある。計算値より、実際の平衡化プロセスのかかった時間は長い。または、計算値より流出量差  $q_s$  が小さい。従って、これらの平衡化プロセスについて、粘性土の圧密現象だけをを用いて説明しきれず、他の原因を考える必要がある。

#### 謝 辞

本報を草するにあたり、有益な御助言をいただいた新藤静夫教授（筑波大学地球科学系）に厚く御礼申し上げます。御助言御指導をいただいた榎根勇教授、高山茂美教授、古藤田一雄助教授、田中正講師、鈴木裕一講師、安原正也技官（筑波大学地球科学系）、多田敦助教授（筑波大学農学研究科）、木村重彦研究官、小前隆美技官（農業土木試験場）に深く御礼申し上げます。

さらに実験でたいへんお世話になりました松本栄次助教授（筑波大学地球科学系）、田口雄作研究官（地質調査所）、小島豊盛技官（元筑波大学水理実験センター）に感謝致します。

#### 文 献

- 岩崎好規（1974）：粘性土中の水圧伝播について。第9回土質工学研究発表会講演集、151—154。
- 木村重彦（1971）：水中のトリチウムによる地下水の流れの研究（I）。農業土木試験場報告、第9号、1—46。
- 木村重彦（1972）：水中のトリチウムによる地下水の流れの研究（II）。農業土木試験場報告、第10号、1—42。
- 佐藤邦明・室田 明（1971）：吸着効果を受ける微速浸透流に関する実験的研究。土木学会論文報告集、第195号、67—75。
- 村上幸利（1977）：粘性土に発生する過剰間隙水圧量の時間依存性。第12回土質工学研究発表会講演集、87—90。
- 村山塑郎・柴田 徹・山本順一（1961）：地盤沈下の模似実験（I）。京都大学防災研究所年報、第4号、11—20。
- 村山塑郎・松尾 稔（1964）：地盤沈下の模似実験（II）。京都大学防災研究所年報、第7号、10—23。
- 山口柏樹・村上幸利（1974）：多次元圧密における過剰水圧の挙動について。第9回土質工学研究発表会講演集、147—150。
- Lutz, J. F. and W. D. Kemper (1959) : Intrinsic Permeability of Clay as Affected by Clay-Water Interaction. *Soil Sci.*, 88, 83—89.