

# パーティカルドレーン周辺の攪乱帯の透水係数に関する実験的研究

尾上 篤生  
(技術研究所)  
Nai-Hsin Ting  
(MIT)

## § 1. はじめに

粘土地盤の圧密を促進するために様々なパーティカルドレーンが使われているが、排除型パーティカルドレーンの打設に伴ってマンドレル周辺の土が攪乱され、攪乱帯の透水係数が原地盤のそれより低下することが以前から指摘されている<sup>1)</sup>。Barron<sup>2)</sup> や Hansbo<sup>3)</sup> は、攪乱帯での透水係数の低下を考慮したパーティカルドレーンによる圧密の近似式を提案した。彼らの近似解の妥当性を検証するために、Onoue<sup>4)</sup> は攪乱帯で透水係数も体積圧縮係数も変化する場合について厳密解を求め、攪乱帯の体積圧縮係数はドレーン圧密に大きな影響を与えないことを明らかにした。これらの解析では、図-1に示すようにドレーン周囲の地盤が、自然地盤の透水性をもつ乱されない領域と、低下した透水性をもつ攪乱帯の2領域から成ると仮定されている。ここで、攪乱帯の領域はケーシング断面積に等価な断面積をもつと仮定され、また両領域の透水係数の比はこれらの既存の解の援用を得て、間隙水圧や地表面沈下の現場実測値からしばしば逆算されてきた<sup>5)6)</sup>。

しかし、これまでに攪乱帯の領域や、そこでの透水係数の値が直接測定されたことは無かった。そこで、これらの実際の値を求め、従来の2領域モデルの妥当性を検証するために粘土に模型ドレーンを貫入し、ドレーンからの距離と透水性の関係を実験的に調べた。その結果、2領域モデルはドレーン圧密の速度を予測する上で実用的であるが、実際には地盤はドレーン近傍から順に、練り返し領域、遷移領域、非攪乱帯の3領域に分けられることが分かった。

## § 2. 円筒状2層土塊の透水係数、透水量、水圧分布

図-1は、透水係数  $k_{h0}$  をもつ均一地盤にパーティカル

ドレーンを打設したときに、ドレーン周辺の地盤が乱されて透水性が  $k_s$  なる一定値に低下した攪乱帯を模式したものであり、ここでは2領域モデルと呼ぶ。

この土塊の上・下端が不透水、側面が透水面であって、外周側面の全水頭が  $h_0$ 、ドレーン内の全水頭が  $h_w$  に保たれているとき、定常的な内向き放射流れの透水がある。ドレーンからの単位時間当たり排水量を  $q$ 、動水勾配を  $i$  とすれば、Darcy の法則によって、

$$q = k_n i A \tag{1}$$

$$\text{ここに、} A = 2\pi H r, \quad i = dh/dr$$

式(1)に  $k_n = k_{h0}$  を代入し非攪乱帯で、一方  $k_n = k_s$  を代入し攪乱帯で積分して、攪乱帯の透水係数低下率を  $\eta = k_{h0}/k_s$ 、攪乱帯半径比を  $S = r_s/r_w$ 、供試体半径比を  $N = r_e/r_w$  で表わせば、

$$h_0 - h_s = C \ln \frac{N}{S} \tag{2a}$$

$$h_s - h_w = C \ln S^\eta \tag{2b}$$

式(2a), (2b)より、

$$h_0 - h_w = C \ln NS^{\eta-1} \tag{3}$$

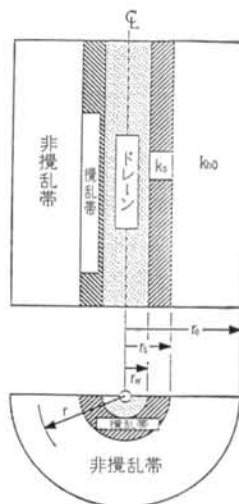


図-1 2領域モデルの土塊とドレーンの模式図

ただし,  $C=q/(2\pi Hk h_0)$ ,  $(r_e, r_s, r_w) =$  (供試体, 攪乱帯, ドレーン) 半径,  $h_s$  は攪乱帯と非攪乱帯の境界での全水頭である。一方, 正規化された水頭分布は,

$$\cdot \text{非攪乱帯} : \frac{h-h_w}{h_0-h_w} = \frac{\ln S^{r-1} + \ln \frac{r}{r_w}}{\ln NS^{r-1}} \quad \dots\dots(4)a$$

$$\cdot \text{攪乱帯} : \frac{h-h_w}{h_0-h_w} = \frac{\ln \left( \frac{r}{r_w} \right)^r}{\ln NS^{r-1}} \quad \dots\dots(4)b$$

同様に, 供試体の平均的透水係数を  $\bar{k}_h$  とすれば,

$$\frac{\bar{k}_h}{k_{h0}} = \frac{C \ln N}{h_0 - h_w} \quad \dots\dots(5)$$

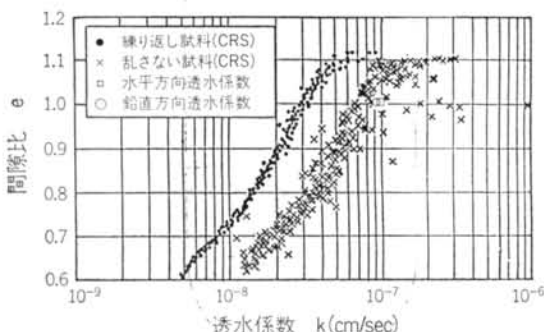
### § 3. 実験方法

#### 3.1 試料の準備

実験に用いた粘土は, 中位の鋭敏比をもつイライト系の海成粘土であるボストンブルークレイ (BBC) であり, その液性限界 (LL) は  $45.2 \pm 0.44\%$ , 塑性限界 (PL) は  $21.74 \pm 0.44\%$ , 100kPa の鉛直応力 ( $\sigma_v$ ) で  $K_0$  圧密した場合の含水比は  $40.6\%$  である。粉体の BBC を  $16\%$  の塩化ナトリウム (NaCl) と, 分散剤としてフェノールを溶解した脱気水に溶き, 真空容器内で充分攪拌して含水比  $100\%$  のスラリーにした後に, これを再沈降・再圧密した。再圧密試料は表一に示す a, b, c の 3 試料で, いずれも最大圧密応力  $\sigma_{vmax}$  まで一次元圧密した後, 水平と鉛直有効応力をはば等しく ( $K_0=1$ ) するために最終鉛

試料名	$\sigma_{vmax}$ (kPa)	$\sigma_{vf}$ (kPa)	間隙比 (e)
a	100	25	1.092
b	200	50	0.978
c	100	25	1.092

表一 再圧密した試料の種類



図一 乱した試料と乱さない試料の透水係数と間隙比の関係 (ボストンブルークレイ)

直応力  $\sigma_{vf} (= \sigma_{vmax}/4)$  までリバウンドさせて, 過圧密比  $= 4$  の最終状態に保った。再圧密容器の内径は  $305\text{mm}$ , 圧密後の試料厚さは約  $140\text{mm}$  である。これら試料を乱さない試料と呼ぶ。

#### 3.2 試料の透水係数と間隙比の関係

図一は, 定ひずみ速度 (CRS) 圧密試験機を用いた再圧密 BBC の圧密試験結果である。これによると, 同じ間隙比に対して完全に攪乱された場合の透水係数は, 乱されない場合の透水係数のおよそ  $1/3$  に低下することが分かる。水平方向と鉛直方向の透水試験結果も同図に併記したが, ほぼ一致しており, 乱さない BBC は透水性に関して等方的である。

#### 3.3 模型ドレーンの貫入

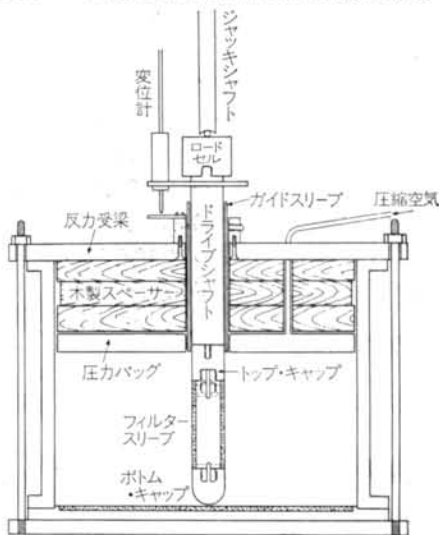
模型ドレーンは, 焼結ブロンズから成る外径 ( $d_w$ )  $32\text{mm}$  のポーラスメタルリング製フィルタースリーブを, サポートスリーブに被せたものである。貫入を容易にするために, 図一に示すようにドレーン先端に頭部を丸く削ったボトムキャップを取り付けた。上載圧として, 試料上部に設置したドーナツ型ゴムバッグ内の水圧を  $\sigma_{vf}$  に保ち, ハンドクランクを用いて約  $75\text{mm/min}$  の速度でドレーンを粘土中に貫入した。

#### 3.4 実験の種類

各々の試料について, 次の 3 種類の実験を行なった。

##### 3.4.1 求心方向排水圧密試験 (試料 c)

模型ドレーンを貫入した試料の下部を切り捨て, ドレ



図一 模型ドレーン打設装置

ーンのボトムキャップを除去した後、底板を不透水板に替えた。図-4に示すように、ドレーン直径よりやや大きい穴を中心にもつ載荷板と木製スペーサーを介して、まず先行荷重を超える120kPaまで段階載荷した。ついで、圧密荷重200kPaまで載荷したときの圧密沈下と間隙水圧を測定し、理論的予測値と比較した。

### 3.4.2 大型水平方向透水試験(試料 a, b, c)

再圧密試料の上部と下部を切り捨て、ドレーンのボトムキャップとトップキャップを除去し、ドレーン貫入に伴う攪乱が最も一様な部分を使って供試体を作製した。供試体の上・下面をワセリンとワックスを塗布したプレキシガラスで挟み、側面にフィルター層を巻いてメンブレンで覆った。これを、図-5に示すように大型チャンバーに收容して拘束圧をかけ、フィルター層とドレーンの間に20kPaの水圧差を与えて水平方向に透水した。

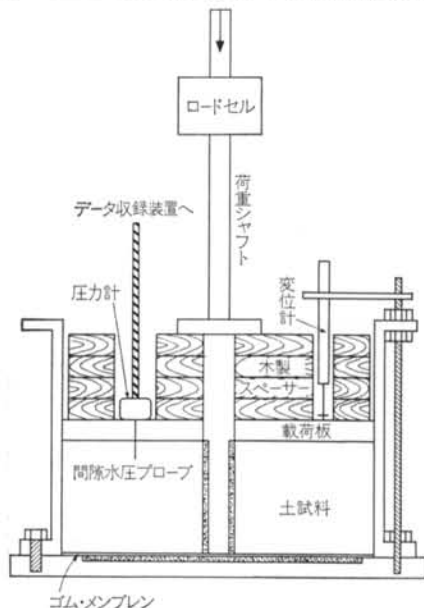


図-4 求心方向排水圧密試験装置

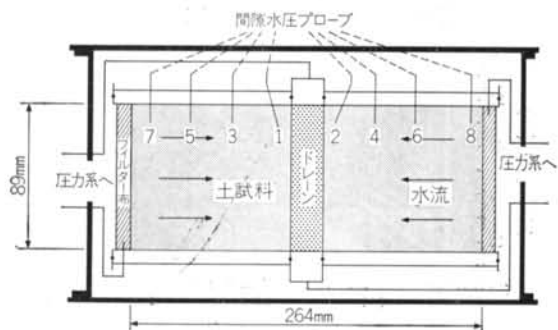


図-5 大型水平方向透水試験装置

上側カバープレートの8カ所の小穴から内径0.64mm、外径1.27mmの注射針を供試体中に10mm挿入し、間隙水圧プローブとした。プローブをできるだけドレーンに近づくために、ドレーンに近い2つの穴はドレーン側に傾斜している。透水中の半径方向間隙水圧分布から透水係数の分布を推定した。

### 3.4.3 小型水平方向透水試験(試料 a, b, c)

上記2つの実験に続いて、供試体高さを76mmまでカットし、長さ13mmの短いドレーンだけ除去して、長さ76mmのドレーンだけ供試体内に残した。一方、供試体直径を114mm、72mm、47mmと順次小さくしつつ、図-6に示すように三軸セル内で水平方向透水試験を行なった。各供試体の平均的半径方向透水係数を求めて、透水係数の半径方向分布を推定した。

## § 4. 実験結果

### 4.1 間隙比に及ぼすドレーン打設の影響

ドレーン打設に伴って発生した間隙水圧消散後の、試料の含水比から計算した間隙比を図-7に示した。ドレーンからかなり離れた距離まで間隙比が低下しており、表-1に示した乱さない粘土の平均間隙比は、 $r/r_w$ が6から7の範囲の外に見られる。間隙比の低下量はドレーン表面で最大で、間隙比にしておよそ0.1である。これを透水係数の低下にすると、図-2によればおよそ30

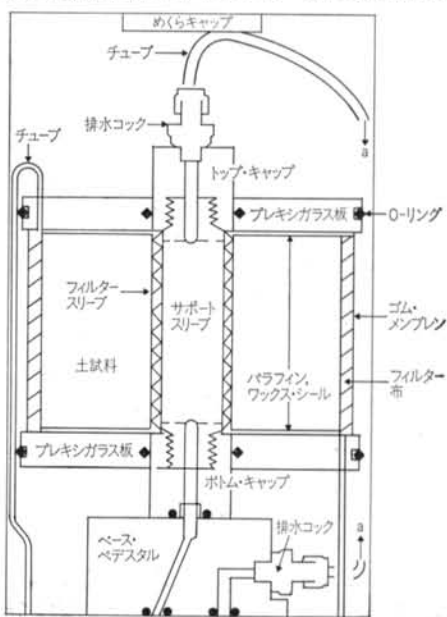


図-6 小型水平方向透水試験装置

%から40%に相当する。

#### 4.2 平均的水平方向透水係数

小型水平方向透水試験中の供試体は図-7に示す不均一な間隙比分布をもち、ドレーンに近いほど透水係数は小さい。したがって、供試体内で一定の透水係数をもつと仮定して計算した平均的透水係数 ( $k_a$ ) は、供試体直径が小さいほど小さい。図-8は、乱さない粘土の透水係数 ( $k_{a0}$ ) で正規化した平均的透水係数と、ドレーン半径で正規化した供試体半径の関係を示している。同図中の曲線は、実験結果に近似することから攪乱帯半径比  $S$  を1.6と仮定し、また妥当と考えられる透水係数低下率  $\eta$  を仮定して式(5)で計算した理論曲線である。表-2の1列目と2列目に、小型透水試験結果と大型透水試験結

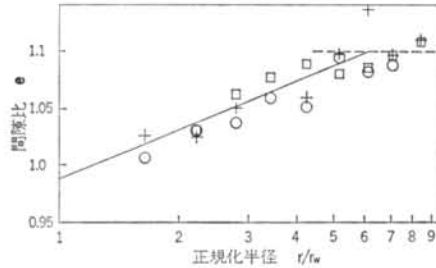


図-7 ドレーン打設に伴って上昇した間隙水圧消散後の間隙比の半径方向分布

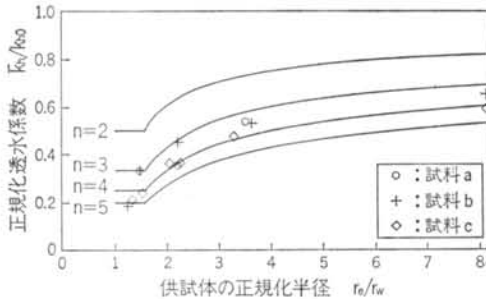


図-8  $S=1.6$  を仮定した2領域モデルに基づく供試体内平均透水係数の理論値と実験値の比較

正規化された攪乱帯半径 $S (=r_e/r_w)$	透水係数低下率 $\eta$	
	小型水平方向透水試験	大型水平方向透水試験
1.3	5	4
1.4	5	3.5
1.5	4.5	3
1.6	4	3
1.7	4	2.5

表-2 供試体内平均透水係数の実験結果を近似する2領域モデルのパラメータの組み合わせ

果に良く一致する ( $S, \eta$ ) の組み合わせを示した。

#### 4.3 大型透水試験と間隙水圧測定値

図-9は、供試体外周と中心ドレーンにおける水頭差で正規化した水頭と、正規化半径との関係を示している。同図には、2領域モデルに基づく式(4)a, 式(4)bで計算した理論曲線も同時に示した。実験結果に一致する計算結果を与える ( $S, \eta$ ) の組み合わせを表-2の1列目と3列目に示したが、これらの結果の方が小型透水試験結果よりも信頼性は高いと考えられる。

#### 4.4 求心方向排水圧密試験

図-10は、120kPaから200kPaまでの処女鉛直有効応力増分に対して、鉛直ひずみの経時変化を示している。

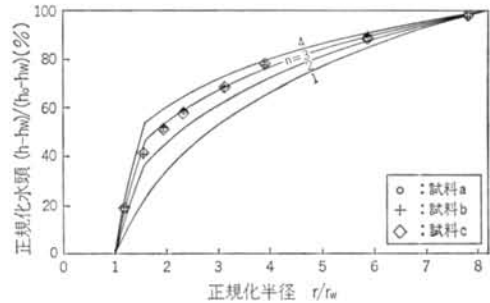


図-9 間隙水圧半径方向分布の実験結果と  $S=1.6$  を仮定した2領域モデルに基づく理論曲線との比較

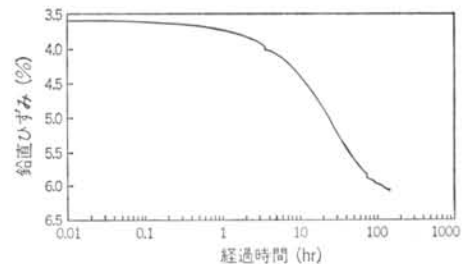


図-10 求心方向排水圧密試験による供試体鉛直ひずみの経時変化 (圧密荷重段階120~200kPa)

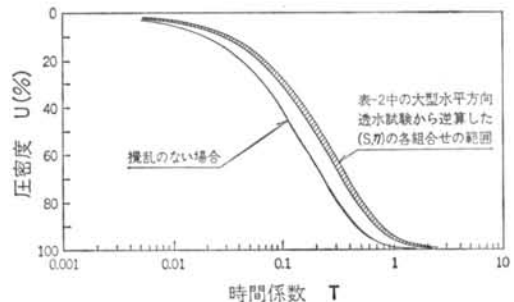


図-11 2領域モデルに基づく理論圧密度曲線

図-11は、圧密度 $U$ に関する2領域理論の一つの解である Hansbo の式：

$$U=1-\exp(-8T/\nu) \quad \dots\dots(6)$$

$$\text{ただし、} \nu = \frac{N^2}{N^2-1} \left( \ln \frac{N}{S} + \eta \ln S - \frac{3}{4} \right)$$

に、大型透水試験結果から推定したパラメータの値を用いて計算した圧密度曲線に及ぼす攪乱帯の影響を示している。同図の時間係数 $T$ は $T=c_{h0} \cdot t/d_e^2$ であり、 $c_{h0}$ は乱さない試料の水平方向圧密係数、 $d_e$ は有効円直径(この実験では、供試体直径)、 $t$ は時間である。この図によれば、大型透水試験結果から推定されるパラメータのどのような組み合わせに対しても、予測曲線は互いにほぼ一致する。50%圧密に対応する攪乱のある場合の時間係数に対して、攪乱が無い場合のそれはほぼ65%である。網干・門田<sup>7)</sup>や浅岡<sup>8)</sup>のカーブフィッティング法によって得られた見掛けの圧密係数 $c_{ha}$ は、いずれも $1.55 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$ であった。図-11によれば、 $c_{ha}$ を0.65で除すことにより、乱さない土の $c_{h0}$ として $2.4 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$ が得られる。また、体積圧縮係数 $m_v=0.030 \text{cm}^2/\text{kgf}$ を考慮して $k_{h0}=7.2 \times 10^{-9} \text{cm}/\text{sec}$ が求まった。圧密中の平均間隙比が約1.0であることから、図-2の中の乱さない粘土の透水係数と間隙比の関係を参照すれば、この値は $k_{h0}$ の値として妥当な値である。

## § 5. 考察

### 5.1 3領域モデル

以上の結果は、既往の2領域モデル理論が求心方向排水圧密の圧密過程を予測する上で充分実用的であることを示している。しかし同時に、実際の透水係数の分布はこれらの理論で仮定されているよりも半径に関してより滑らかであって、供試体の領域を図-12に示す以下の3つの領域に分ける方がより現実的である。

・領域Ⅰ：乱されない、すなわち $e=e_0$ 、 $k=k_{h0}$ の領域で、図-7に示す間隙比のデータから、この領域はおよ

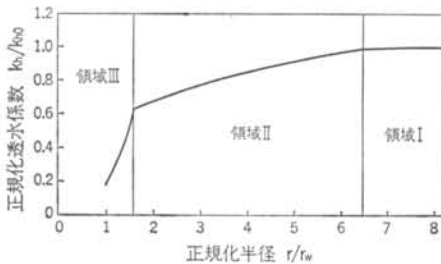


図-12 3領域モデルとその透水係数分布の模式図

そ $r=6.5r_w$ より外側にある。

・領域Ⅱ：ドレーン打設によって間隙比が、またそのために透水係数が低下する遷移領域。図-7の $e \sim \log(r/r_w)$ の勾配を $C_e$ 、図-2の $e \sim \log k$ の勾配を $C_k$ としたとき、

$$\frac{de}{d \log(r/r_w)} = C_e, \quad \frac{de}{d \log k_h} = C_k$$

この両式より透水係数は、

$$k_h = k_{h0}(r/r_i)^\alpha \quad \dots\dots(7)$$

と書ける。ただし、 $\alpha = C_e/C_k$ である。また、 $r_i$ は領域Ⅱの外側半径である。

・領域Ⅲ：間隙比の低下に加えて、土の練り返しにより透水係数が低下する練り返し領域。ドレーン側面での透水係数の最大低下量は、完全攪乱による低下量に匹敵する。すなわち、間隙比の変化が無い条件で、練り返しによって低下する透水係数低下率の最大値を $\eta_{\max}$ とすれば、 $r=r_w$ で $k_{h,r_w} = k_{h0}(r_w/r_i)/\eta_{\max}$ 、 $r=r_s$ で式(7)より $k_{h,r_s} = k_{h0}(r_s/r_i)$ となる。これらの境界値を満たし、領域内で連続的に変化する透水係数分布の一つとして、

$$k_h = \frac{k_{h0}}{\eta_{\max}} \left( \frac{r_w}{r_i} \right)^\alpha \left( \frac{r}{r_w} \right)^\beta \quad \dots\dots(8)$$

によって近似することができる。ただし、

$$\beta = \alpha + \frac{\log \eta_{\max}}{\log S} \quad \dots\dots(9)$$

である。

### 5.2 3領域モデルの水頭分布理論値

前項の透水係数分布をもつ円筒供試体の外周側面( $r=r_e$ )に $h_0$ 、中心ドレーン( $r=r_w$ )に $h_w$ を負荷した内向き放射流れの水平方向定常透水時に、遷移領域と非攪乱帯との境界( $r=r_i$ )における水頭が $h_i$ であるとする。この場合、各領域における透水量 $q$ と水頭 $h$ は以下のように式示できる。

・領域Ⅰ：式(1)に $k_h=k_{h0}$ を代入し、境界条件 $r=r_i$ で $h=h_i$ のもとにこれを積分すれば、

$$q = f_1(r_e)(h_0 - h_i) \quad \dots\dots(10)$$

$$h_0 = h_i + \frac{q}{f_1(r)} \quad \dots\dots(11)$$

$$\text{ただし、} f_1(r) = \frac{2\pi H k_{h0}}{\ln r - \ln r_i} \quad \dots\dots(12)$$

・領域Ⅱ：式(1)に式(7)を代入し、領域全体で積分すれば、

$$q = f_2(r_i)(h_i - h_e) \quad \dots\dots(13)$$

$$h = h_e + \frac{q}{f_2(r)} \quad \dots\dots(14)$$

$$\text{ただし、} f_2(r) = \frac{2\alpha\pi H k_{h0}}{r_i^\alpha \left( \frac{1}{r_s^\alpha} - \frac{1}{r^\alpha} \right)} \quad \dots\dots(15)$$

・領域Ⅲ：式(1)に式(8)を代入し、領域全体で積分すれば、  

$$q = f_3(r_s)(h_s - h_w) \quad \dots\dots(16)$$

$$h = h_w + \frac{q}{f_3(r)} \quad \dots\dots(17)$$

$$\text{ただし、} f_3(r) = \frac{2\beta\pi H k_h r_w}{r_w^\beta \left( \frac{1}{r_w^\beta} - \frac{1}{r_s^\beta} \right)} \quad \dots\dots(18)$$

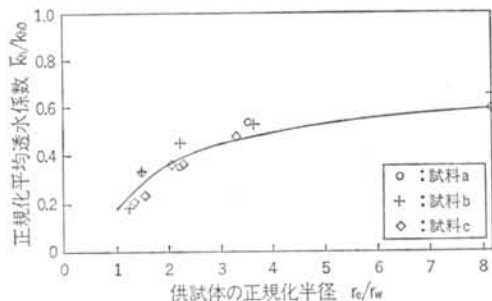
結局、単位時間当たり透水量  $q$  は、式(10)、式(13)、式(16)から次式で与えられる。

$$q = \frac{h_0 - h_w}{\frac{1}{f_1(r_e)} + \frac{1}{f_2(r_i)} + \frac{1}{f_3(r_s)}} \quad \dots\dots(19)$$

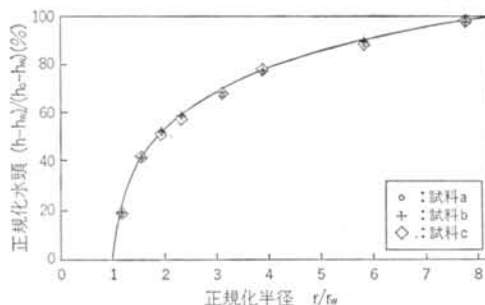
### 5.3 3領域モデルの平均的透水係数

3領域モデルにおいて、小型水平方向透水試験供試体のように直径が順次減少する場合の平均的透水係数は、供試体半径と領域半径の大小によって式示が異なる。 $r_e > r_i$  のとき供試体には3領域とも含まれるから、透水量は式(19)で示されるが、 $r_i > r_e > r_s$  のときは、

$$q = \frac{h_0 - h_w}{\frac{1}{f_2(r_e)} + \frac{1}{f_3(r_s)}} \quad \dots\dots(20)$$



図一13  $S=1.6$  を仮定した3領域モデルに基づく供試体内平均透水係数の理論値と実験値の比較



図一14 間隙水圧半径方向分布の実験結果と  $S=1.6$  を仮定した3領域モデルに基づく理論曲線との比較

で示され、 $r_s > r_e$  のときは、

$$q = f_3(r_e)(h_0 - h_w) \quad \dots\dots(21)$$

となる。これらの  $q$  を使って、供試体の平均的透水係数は以下のように表わせる。

$$k_h = \frac{q \ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right)}{2\pi H (h_0 - h_w)} \quad \dots\dots(22)$$

### 5.4 3領域モデルによる理論値と実験結果の比較

今回の実験結果から得られたパラメータである  $C_r = 0.134$ ,  $C_k = 0.5$ ,  $\eta_{\max} = 3$ ,  $S = 1.6$  を使い、式(7)、式(8)の正規化透水係数の半径方向分布を図一12に示した。図一13は、式(20)から計算した小型水平方向透水試験各供試体の半径と平均的透水係数の関係を実測値と比較したものである。また、図一14は大型透水試験中の間隙水圧分布実測値と、式(11)、式(14)、式(17)から計算した理論値の比較であるが、両者の間に非常に良い一致が認められる。このことは、間隙比の減少による透水性の低下と繰り返しによる透水性の減少が、いずれも同程度に重要であることを示している。

## § 6. 結論

本研究から、次の2つの主な結論が得られた。

(1) 実験から推定された  $\eta$  (含水比一定のものとの繰り返しによって透水係数が低下する割合) = 3 と  $S = 1.5 \sim 1.6$  の値を用いた、既往の2領域モデルに基づく求心方向排水圧密過程の予測は、充分実用的である。

(2) 実際の透水係数の半径方向分布は、ドレーン打設後の先行荷重までの再圧密過程中的間隙比低下と、ドレーン周囲の(完全な、あるいは部分的な)繰り返しの結果、2領域モデルよりもずっと複雑である。

3領域モデルの透水係数について一つの式示を提案したが、これを考慮したドレーン圧密の解析解を得ることは困難であるとしても、数値計算において考慮するならば、従来より高い精度をもった圧密度予測が可能になると考えられる。

謝辞 この研究は、筆者が1989年3月から1990年3月までの間、マサチューセッツ工科大学 (MIT) に客員研究員として滞在中に実施した共同研究である。MIT の Robert V. Whitman 教授、John T. Germaine 研究主任、Charles C. Ladd 教授から有益な助言を賜りました。ここに、記して深謝いたします。

<参考文献>

- 1) 例えば, L. Casagrande & S. Poulos: "On the Effectiveness of Sand Drains" Canadian Geotechnical Journal, Vol. 6 (1969) pp. 287~326
- 2) R.A. Barron: "Consolidation of Fine Grained Soils by Drain wells" Transactions of ASCE, Vol. 113, No. 2346 (1948) pp. 718~742
- 3) S. Hansbo: "Consolidation of Fine-Grained Soils by Prefabricated Drains" Proceedings of 10th ICSMFE, Vol. 9 (1981) pp. 677~682
- 4) A. Onoue: "Consolidation by Vertical Drains taking Well Resistance and Smear into Consolidation" Soils & Foundations, Vol. 28, No. 3 (1988) pp. 165~174
- 5) H. Aboshi & T. Inoue: "Prediction of Consolidation Settlement of Clay Layers, Especially in the Case of Soil Stabilization by Vertical Drains" Proceedings of IEM-JSSMFE Joint Symposium on Geotechnical Problems (1986) pp. 31~40
- 6) S.J. Johnson: "Foundation Precompression with Vertical Sand Drains" J. of Soil Mechanics & Foundation Engineering Div., ASCE, Vol. 96, No. SM1 (1970) pp. 145~175
- 7) H. Aboshi & Monden: "Determination of the Horizontal Coefficient of Consolidation of an Alluvial Clay" Proceedings of 4th Australia New Zealand Conference on Soil Mech. & Found. Eng. (1963) pp. 159~164
- 8) A. Asaoka: "Observational Procedure of Settlement Prediction" Soils & Foundations, Vol. 18, No. 4 (1978) pp. 87~101

:

I

:

: