

**投稿論文 (報告)**

**TECHNICAL  
REPORT**

# 三軸セルを用いた深い地盤の透水性調査法

福島伸二\*・望月美登志\*\*・香川和夫\*\*\*

本報告は三軸セルを用いた透水試験法の深い地盤の透水性調査への適用性について実験的に検討したものである。この方法は使用する供試体をボーリングにより採取したコア試料を用いることで各地層の不攪乱状態における透水性（鉛筆・水平方向）を応力状態や動水勾配などの原位置の透水環境を考慮して求めることができる。豊浦砂による検定試験と不攪乱試料の試験によりその適用性が示された。

**Keywords :** permeability, deep underground, triaxial cell, confining pressure

## 1. ま え が き

近年東京のような大都市圏においては過度の人工集中による利用可能用地の不足や地下高騰などによる用地取得難により土地所有権の及ばない大深度地下の開発が構想されている。この構想による大深度地下の開発は鉄道・道路などの交通トンネルの掘削あるいはエネルギー施設のための大規模地下空間の掘削などの形態で進められると考えられる。このような深い地下の掘削問題で対象となるのは砂質土やシルトの互層の未固結地盤である場合が多く、掘削の事前調査ではその地盤の強度・変形特性とともに透水性を知ることも重要な項目である。透水性調査について考えると、一般に成層地盤では鉛直方向と水平方向とで透水性が異なり水平方向の透水性が大きい。特にこのような地盤の掘削問題では掘削切羽面の地下水流動に対する安定性の評価や、掘削による地下水環境の変化予測をするには地盤の透水性やその異方性を正確に把握することが重要である。一般に原地盤の透水性調査はボーリング孔を利用した現位置透水試験により調べられるが、この方法は地盤の方向による透水性を区別して求めることは難しく、また成層地盤の各地層毎の透水性調査や、深い地盤の試験には適していない。

そこで本報告では深い地盤からボーリングなどにより採取した不攪乱状態にあるコア試料を用いて、鉛直および水平方向の透水性を調べることができ三軸セルを用いた透水試験法の適用性について検討した結果をまとめたものである。

## 2. 三軸セルを用いた透水試験装置

通常型の透水試験は供試体は鋼製のモールド内の供試体に水を流して透水係数を求めるが、モールドと供試体との間が水みちになりやすいこと、供試体の応力状態が不明確であること、そして供試体を完全に飽和させることが難しく透水性を過小評価する可能性があることなどの問題がある。また深い地盤から採取した不攪乱試料の試験に必ずしも適していない。これに対してここで実施した透水試験は図-1に示すように通常の三軸試験用セルを使用し、三軸試験用キャップ・ベダスタルを透水試験用キャップ・ベダスタルに交換して拘束圧下における土の透水試験ができるものである。この種の試験は、Fukushima, S. and Ishi-i, T. (1986)<sup>1)</sup>, Carpenter, G. W. and Stephenson, R. W. (1986)<sup>2)</sup>により実施されている。三軸セルを用いた透水試験の利点は地盤中で土の要素が受ける応力状態の下での透水性が求められること（供試体の応力状態が明確）、供試体に背圧  $\sigma_{BP}$  を加えて飽和度を高められること、広い範囲にわたり動水勾配を制御できること、また必要に応じて透水試験後に三軸圧縮試験が可能であることが上げられる。ここで実施した透水試験は試験原理により以下の2種類である。

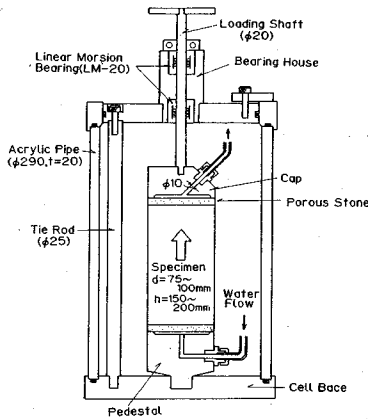
### (1) 円柱・立方体供試体を用いた透水試験法

円柱供試体（直径  $d=75-100$  mm, 高さ  $h=150-200$  mm）の試験は図-1の円形キャップ・ベダスタルとポラスストーン円板（厚さ  $t=10$  mm）を用いる。この透水試験用キャップ・ベダスタルは通常の三軸試験用と同じものであるが、特に水が流れる時に水頭損失がないように内径の大きいシンフレックスチューブ（N2-1-1/2, 外径  $\phi 12.7$  mm, 内径  $\phi 9.56$  mm）を使用し、フィルターとしてのポラスストーン（透水係数： $k=5.55-6.10 \times 10^{-2}$  cm/sec）を通じて供試体に水が一様に流れるようにしてある。透水性がさほど大きくない土の試験では

\* 工博（株）フジタ 技術研究所土木研究部  
（〒223 横浜市港北区大圃町74）

\*\* 工修（株）フジタ 技術研究所土木研究部

\*\*\* 工修（株）フジタ 土木本部技術部



図一 三軸セルを用いた透水試験装置 (円柱供試体)

ここで使用したものより径の小さいチューブの使用も可能である。

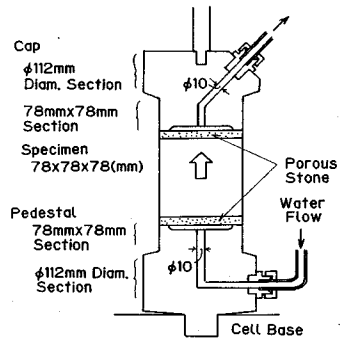
立方体供試体 (78 mm×78 mm×78 mm) の試験では図一2に示すように正方形断面をもつキャップ・ベデスタルを用いるが、これらはそれぞれ供試体に接する部分の正方形断面部 (78 mm×78 mm) とスリーブ状のメンブレンをシーリングする円形断面部 (φ112 mm) の二つの部分からなっている。供試体上・下端面にはフィルターとしてのポーラスストーン板 (78 mm×78 mm×厚さ5 mm) をおく。これらの供試体の上・下端はそれぞれ圧力ビュレット (A, B) に連絡されており、透水試験はこれらのビュレット間に水頭差を設けて図一3のシステム図に示すようにビュレットAの水をベデスタルを通じて供試体の下端から上向きに、さらにキャップからビュレットBに流して行く。透水係数は両ビュレットの断面積が同じ ( $a_A = a_B = a$ ) であれば次式から求まる<sup>1)</sup>。

$$k = 2.303 \cdot h_s \cdot a \cdot \log_{10}(H_1/H_2) / 2 \cdot A_s \cdot (t_2 - t_1) \dots (1)$$

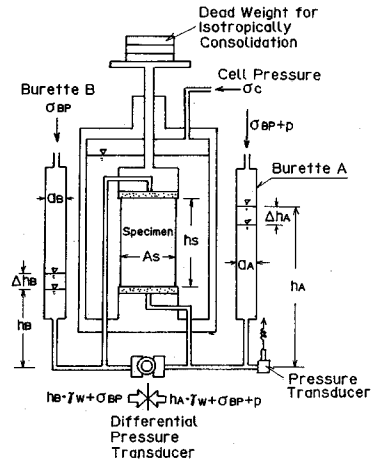
両ビュレット間の試験開始時 ( $t = t_1$ ) と終了時 ( $t = t_2$ ) の水頭差はそれぞれ  $H_1 = h_A - h_B$ ,  $H_2 = H_1 - (\Delta h_A + \Delta h_B)$  となるが、これらは差圧計により正確に測定し動水勾配を算出する。また大きな動水勾配で水を流したい場合にはビュレットA内に圧力 ( $p$ ) を加えて試験をするが (水頭差が差圧計の測定容量を越える場合は圧力変換器によりこれを測定する), この時は上式の  $H_1$  は  $H_1 + p/\gamma_w$  となる。ここで注意すべきはこの圧力が大きくなると供試体の上・下端面間での圧力差が大きくなり応力分布が高き方向に一樣にならない影響が現われてくることである。

(2) 中空円筒供試体を用いた透水試験法

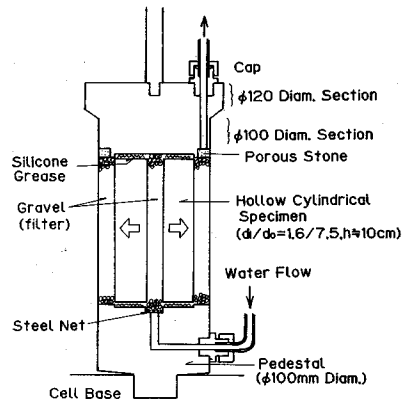
中空円筒供試体を用いる透水試験では水を供試体に流すシステムは図一1, 図一2の試験法と同じであるが、この装置は図一4に示すように供試体の内側円筒面から放射状に水を流して水平方向の透水係数を調べるための



図一2 立方供試体を用いた透水試験



図一3 三軸セルを用いた透水試験システム



図一4 中空円筒供試体を用いた透水試験

ものである。透水試験中の水はビュレットA・B間の水頭差によりビュレットAからベデスタルの中心部を流れて供試体の内側円筒面から放射状に供試体内を流れ、さらに外周にあるフィルターを通してキャップからビュレットBに流れる。この透水試験における透水係数は図一5に示すようにビュレット間の水頭差 ( $H$ ) は時間のみの関数であること ( $H = H(t)$ ), また供試体の

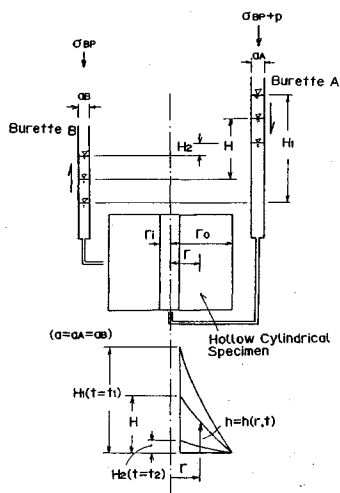


図-5 中空円筒供試体による透水係数の計算法

内・外円筒面間の水頭差 ( $h$ ) は供試体の半径位置と時間の関数であること ( $h=h(r, t)$ ) を考慮すると次式のように求められる<sup>3)</sup>。

$$k = (2.303)^2 \cdot a \cdot \log_{10}(r_o/r_i) \cdot \log_{10}(H_1/H_2) / 4 \cdot \pi \cdot h_s \cdot (t_2 - t_1) \dots \dots \dots (2)$$

動水勾配を大きくするためにピュレット A 内に圧力 ( $p$ ) を加えた場合には上式の  $H_1$  は  $H_1 + p/\gamma_w$  にする。

### 3. 豊浦砂への適用性

ここでは三軸セルを用いた透水試験法の検定のために実施した豊浦砂の透水試験結果について述べる。円筒供試体は通常の三軸試験と同様にペダスタルに二つ割りモールドをセットし、この内面に負圧でメンブレンを密着させ、この中に乾燥状態にある砂をロート（出口寸法 2 mm × 20 mm）によりある一定の高さから自由落下させて作製した（空中落下法）。供試体上面を平らにしながらからキャップをセットし、さらにこれにメンブレンをシーリングする。負圧  $\sigma_{NE} = -0.2 \text{ kgf/cm}^2$  を供試体に加え自立させ、モールドをはずす。供試体寸法測定後、三軸セルを組み立てセル水を入れる。負圧とセル圧  $\sigma_c$  を交換して、炭酸ガス ( $\text{CO}_2$ ) を通した後脱気水を流して飽和する。さらに飽和度を高めるために背圧  $\sigma_{BP} = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$  を加える。飽和度の確認は非排水繰返し試験で採用される  $B$  値を測定することにより行い、この試験では  $B = 0.97$  以上を確保した。

立方体供試体を用いた試験では内側寸法 78 mm × 78 mm の樹型モールド内に乾燥状態にある砂の空中落下法で供試体を作製した後、これを下部から水で飽和させてから水抜きをして不飽和状態にして約  $-20^\circ\text{C}$  の冷凍庫内で凍結させる。モールドをはずして供試体を

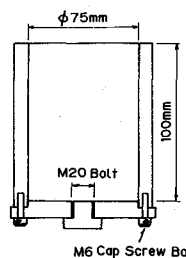


図-6 中空円筒供試体作製用モールド

取り出し三軸セルにセットしメンブレンをかぶせる。供試体に負圧  $\sigma_{NE} = -0.2 \text{ kgf/cm}^2$  を加えて 3~4 時間放置して融解させてから、供試体の寸法を測定する。この後の手順は円筒供試体と同じである。

中空円筒供試体は図-6 に示すような内径  $\phi 75 \text{ mm}$ 、高さ 100 mm の二つ割りモールド内に乾燥砂で空中落下法により作製し、立方体供試体と同様の手順で凍結させる。凍結後モールド底部のプラグをはずし、直径  $\phi 16 \text{ mm}$  のドリル刃で孔をくり抜いてからモールドをはずし中空円筒供試体を準備する。三軸セルのペダスタルには供試体外径  $\phi 100 \text{ mm}$  用の二つ割りモールドとメンブレンをセットしておき、この中に凍結したままの中空円筒供試体を置く。この中空円筒供試体の内側と外側にはフィルター用の透水性の大きい礫を入れ（礫の平均粒径 ( $D_{50}$ ) は試験試料のその 4~5 倍程度とし、透水係数は  $k_F = 1.6 \times 10^{-1} \text{ cm/sec}$ ）、キャップをセットしてからメンブレンをシーリングする。供試体に負圧  $\sigma_{NE} = -0.2 \text{ kgf/cm}^2$  を加えて 3~4 時間放置して融解させ、供試体の高さを測定する。供試体の内・外径は測定できないのでここでは  $r_i = 8 \text{ mm}$ 、 $r_o = 37.5 \text{ mm}$  として扱った。また供試体の上・下端面とキャップ・ペダスタルの間の隙間にはここが水みちとならないようにシリコングリースの薄い層をおく。この後の手順は円筒供試体の場合と同じである。尚、フィルター用の礫の影響を調べるために図-1 の円筒供試体を用いた試験においてポーラストーンの代わりに層厚 1.5 cm でこの礫を用いた透水試験を実施したが、この礫の影響はほとんどないことを確認している。

図-7 に円筒供試体の拘束圧  $\sigma_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$  における透水試験により求めた豊浦砂の透水係数 ( $k_v$ ) とその時の間隙比 ( $e_{1.0}$ ) の関係を片対数グラフ上にプロットしてある。これより透水係数は間隙比が大きくなるほど大きくなること、また片対数プロット上で透水係数と間隙比はほぼ直線関係にあることがわかる。このことは透水係数と間隙比の関係が Taylor, P. W. (1966)<sup>4)</sup> が細粒砂について提案した次式

$$k_v = \exp(C_1 \cdot e + C_2) \dots \dots \dots (3)$$

で表わせることを示している。また彼は砂に対して  $k_v = C \cdot e^2 / (1 + e)$  あるいは  $k_v = C \cdot e^2$

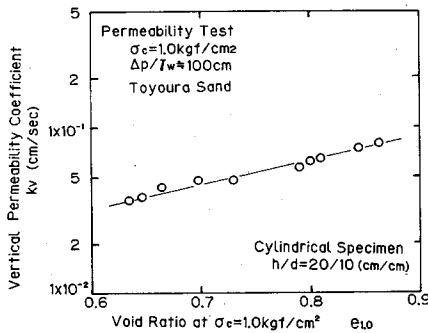


図-7 透水係数と間隙比の関係

も提案している。これらのうち第1式の一般式として Samarasinghe, A. M. et al. (1982)<sup>5)</sup>は、

$$k = C_1 \cdot e^{m_1} / (1 + e) \dots\dots\dots (4)$$

を提案している。これと同様に第2式も一般式で表わせば次式

$$k = C_2 \cdot e^{m_2} \dots\dots\dots (5)$$

になる。図-8には式(4)と式(5)の関係をプロットしてある。多少のパラツキがみられるが、両式とも透水係数の密度に対する変化をうまく表せることがわかる。次に拘束圧を  $\sigma_{c,0.2} = 0.2 \text{ kgf/cm}^2$  から段階的に上げてゆき、各拘束圧レベルにおいて求めた透水係数を拘束圧  $\sigma_c = 0.2 \text{ kgf/cm}^2$  における透水係数 ( $k_{v,0.2}$ ) で除した結果を図-9に示した。この図からわかるように拘束圧による影響は見られるが小さい。これは豊浦砂のような粒径のそろったきれいな砂の透水係数は初期の密度で決まり、拘束圧による間隙比の減少程度の密度変化は大きな影響を及ぼさないためと考えられる。次に図-10(a)に動水勾配を変えて実施した透水試験結果を示した。そして図-10(b)には図-10(a)から密度  $e = 0.65, 0.85$  における各動水勾配における透水係数を読み取り圧力水頭  $\Delta p / \gamma_w = 100$  (cm) における透水係数  $k_{v,100}$  で除した値を示してある。これらの図から透水係数は、動水勾配が大きくなると透水係数は2~3割低下することがわかる。図-11には円柱供試体と立方体供試体を用いた透水試験を行い供試体形状による透水性の相違について調べた結果を示す。これは供試体の形状による透水断面積、あるいは透水路長が異なることの影響を調べるために実施したものである。両供試体の鉛直透水係数は形状によらず同じで、立方体供試体により豊浦砂の透水係数の異方性を調べても問題がないことがわかる。この図から透水係数の異方性についてみると豊浦砂の水平透水係数は鉛直透水係数よりやや大きく、またその異方性の程度は砂が密な場合の方が大きくほぼ

ゆる詰め:  $k_H \approx 1.2 \cdot k_v$  ( $e_{1.0} \approx 0.80$ )

密詰め:  $k_H \approx 1.4 \cdot k_v$  ( $e_{1.0} \approx 0.65$ )

であることがわかる。図-12には立方体供試体と中空

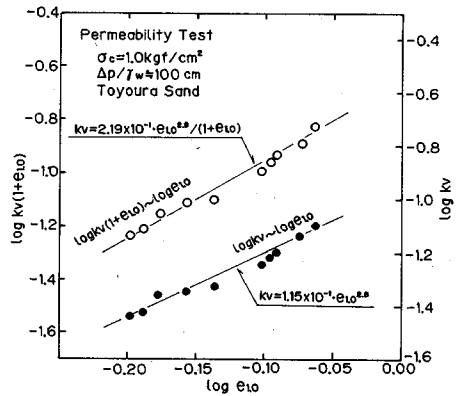


図-8 透水係数と間隙比関係の近似

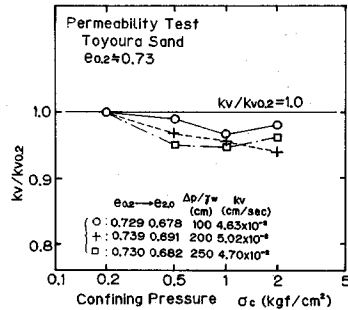


図-9 透水係数に及ぼす拘束圧の関係

円筒形供試体を用いた水平方向透水係数を求めた試験結果をプロットしてある。中空円筒供試体を用いた透水試験による結果は立方体供試体を用いた透水試験の結果よりやや小さい値を与え約7~8割程度の値になっている。この差は供試体形状あるいは透水原理によるものなのかは不明であるが、この試験から求めた透水係数についてはこのような差異があることを認識しておけば、深い地盤の各地層からコア試料が採取できれば、鉛直透水係数は円柱供試体を用いた、また水平透水係数は中空円筒供試体を用いた透水試験により地層別に透水性を求めることが可能であろう。しかしこの試験装置により水平方向透水係数を求める試験は試験操作が面倒なこと、また上述したように試験法による差異があることから、コア試料からサイコロ状の立方体供試体を切り出して堆積面と水の流れる方向を同じにして図-1あるいは図-2に示した透水試験装置により水平方向透水係数を求める方法も考えられる(この方法は供試体の作製が面倒なことや供試体寸法が小さくなる問題があるが、試験は簡単である)。

#### 4. 深い地盤の透水性調査例

ここでは大深度地盤の透水性調査のために都内のある高層ビルの建設現場(渋谷区千駄ヶ谷4丁目付近)において地表面から  $z \approx 15 \text{ m}$  まで掘削したビルの地下3

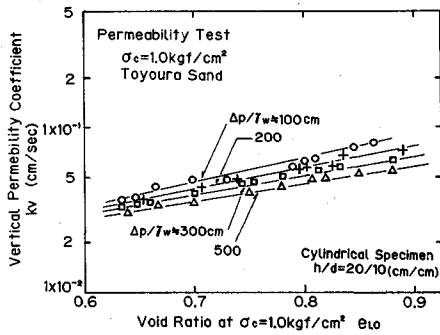


図-10 (a) 動水勾配を変えた透水試験結果

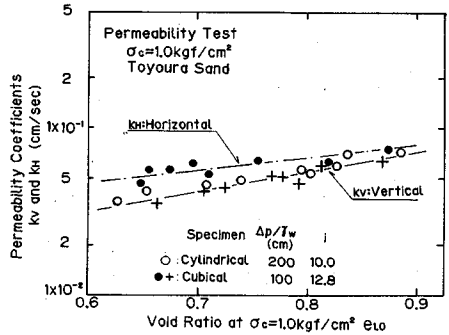


図-11 円柱供試体と立方体供試体による透水係数

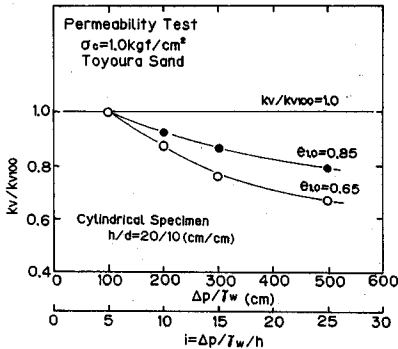


図-10 (b) 透水係数に及ぼす動水勾配の影響

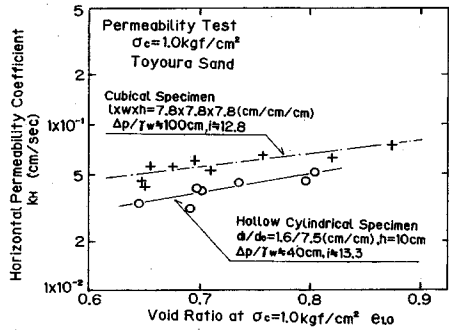


図-12 中空円筒供試体による水平透水係数

階部分にボーリングマシンを設置し、地表面から約  $z = 32.5$  m から 150 m の区間でコア試料を連続的に採取した。ボーリングコアはデニソンサンプラーにより採取し、未固結なコア部分は現地で液化窒素により凍結後試験室に持ち込んだ。ここでは自立性の低い未固結な砂質土だけを凍結させて供試体を準備したが、豊浦砂の凍結及び非凍結供試体の試験結果によると両者は同じ透水係数を示していることから判断すると砂質試料を凍結～融解させたことが透水性に及ぼす影響は小さいものと考えられる。

図-13 にボーリング地点の柱状図と物理特性、また別途実施した排水三軸圧縮試験から求めた強度パラメータ ( $c, \phi_d$ ) を示す。供試体は採取したコア試料を所定の長さ (15 cm, あるいは 10 cm) に切断して準備した。長さ  $h_s = 15$  cm (供試体高さに相当) の供試体は堆積面に垂直方向の透水係数  $k_v$  (鉛直透水係数) を求めるために使用した。供試体を三軸セルにセットしメンブレンを被せて  $\sigma_{NE} = -0.2$  kgf/cm<sup>2</sup> の負圧を加えて放置する。供試体が融解後供試体の寸法測定し、その後は前節で述べた円柱供試体の透水試験と同じ手順で、地盤中の土被り圧 ( $\sigma_z = \gamma \cdot z$ ) とほぼ同じ拘束圧で等方圧密して透水試験を行った ( $\gamma$  は水中単位重量)。但し使用した三軸セルの耐圧が 7.0 kgf/cm<sup>2</sup> であるため背圧  $\sigma_{BP} = 1.0$  kgf/cm<sup>2</sup> を差し引いた  $\sigma_e = 6.0$  kgf/cm<sup>2</sup> が試験可能な拘

束圧となるので、深度 GL-60, 0 m 以下の試料の試験は拘束圧  $\sigma_e = 6.0$  kgf/cm<sup>2</sup> とした。長さ  $h_s = 10$  cm の供試体は前節と同じ手順で作製した中空円筒供試体により透水試験を実施し、堆積面に平行な方向の透水係数  $k_H$  (水平透水係数) を求めた。

試験結果は図-13 の右側に示した。また図には比較のために円柱試料から 5 cm × 5 cm × 5 cm にした立方体供試体を用いた透水試験から水平方向の透水係数を求めた結果も示してある。ここで試験した土は豊浦砂よりも透水性は低い、この程度の透水性をもつ土では中空円筒供試体と立方体供試体との差はほとんどなく、得られる透水係数は同等である。この図からこの地盤の透水性はシルト質細砂では  $k_v = 1.0 \sim 5.0 \times 10^{-5}$  cm/sec、固結シルト層で  $k_v = 5.0 \times 10^{-5} \sim 1.0 \times 10^{-4}$  cm/sec と低く、そして、細砂層では  $k_v = 1.5 \sim 2.5 \times 10^{-4}$  cm/sec となっている。透水性の異質性は、水平方向の透水性が鉛直方向に対して砂質層あるいは固結シルト層では 2~3 倍程度、またシルト質砂層では約 3~4 倍程度大きくなっている。各地層の拘束圧の増加に伴う透水係数の変化を調べるために、拘束圧を  $\sigma_e = 0.2$  kgf/cm<sup>2</sup> から段階的に増加させて各拘束圧レベルにおける透水係数を求めた結果を図-14 に示してある。この図から地層により傾向は異なるが拘束圧の増加により透水性は低下し、そしてこの両者の関係は両対数グラフ上で直線

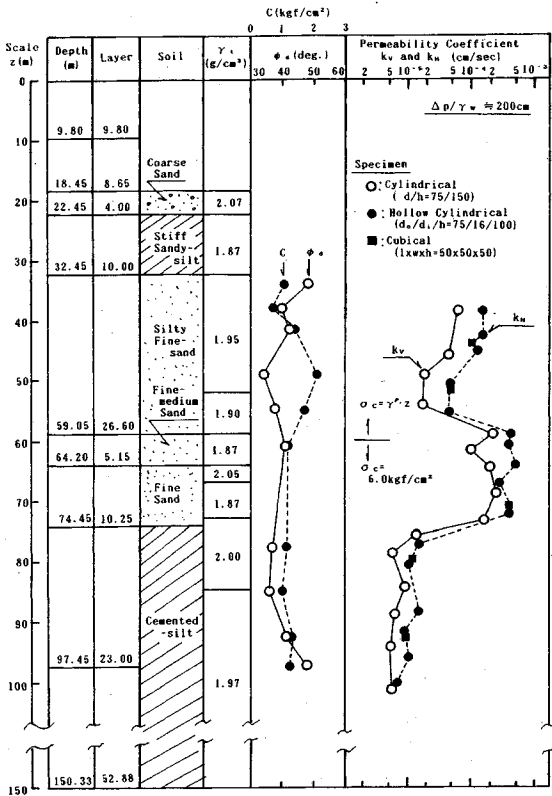


図-13 深い地盤の透水調査例

$$k_v = C_3 \cdot \sigma_c^{m_3} \dots \dots \dots (6)$$

で近似できることがわかる。ここで  $C_3$  は  $\sigma_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$  における透水係数、 $m_3$  は直線の傾きで地層により異なる値をもつ。このような拘束圧増加に伴う透水性の低下は圧密による間隙の減少によるものと考えられるが、固結シルトでは他の地層に比較して拘束圧の増加による透水性の変化が比較的小さいのは固結度が高いためであろう。深度 GL-38.5 m におけるシルト質砂層については拘束圧を  $\sigma_c = 6.0 \text{ kgf/cm}^2$  まで増加さらに  $1.0 \text{ kgf/cm}^2$  まで減少させた時の透水係数を示してあるが、同じ拘束圧でも増加過程と減少過程では透水係数は同じにならず減少過程、つまり過圧密状態では透水係数は小さくなり透水性が応力履歴に依存していることがわかる。このように透水性が応力履歴に強く依存する地層では原位置の土の要素が掘削により受ける応力変化に対応した透水係数を求める必要がある。次に各地層の動水勾配の影響を調べた結果を図-15 に示してあるが、どの地層も動水勾配による影響はほとんどないようである。

以上より地盤の透水性には異方性や拘束圧の影響が大きいことがわかったが、地盤内の掘削による地下水位低下の影響や排水量の信頼性の高い予測を行うにはこのような要因の影響を考慮して試験と浸透解析を行う必要が

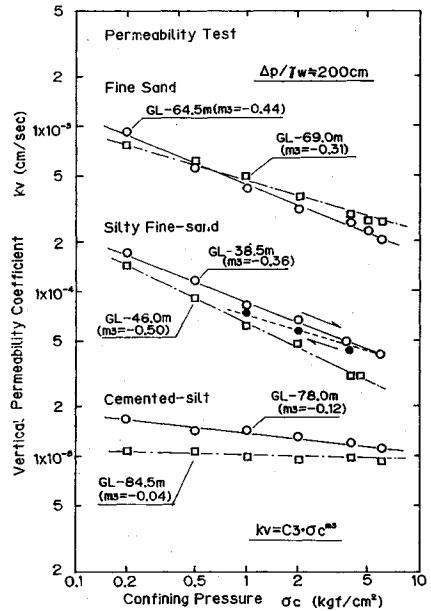


図-14 各地層の透水係数に及ぼす拘束圧の影響

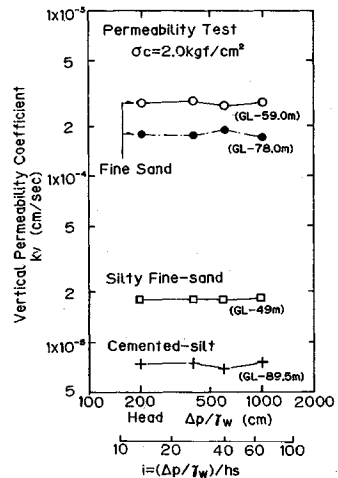


図-15 各地層の透水係数に及ぼす動水勾配の影響

あろう。

### 5. あとがき

ここで述べた透水試験法は大深度地下開発で問題となるような深い地盤の透水性調査に適用できる。この透水試験法は使用する供試体をボーリングにより採取したコア試料と三軸セルを用いることにしたことで、各地層の不攪乱状態における透水性（鉛直・水平方向）を応力状態、動水勾配などの原位置の透水環境を考慮して求めることができる。特に掘削時の切羽の地下水流動に対する安定性の検討に必要な掘削断面内や先端部にある地層別の異方性を考慮した透水性を正確に測定できるものと考

えられる。

最後に本報告中の試験のうち豊浦砂の試験の一部は佐藤研一氏（現茨城大学工学部）が当社に在職中に実施したものであることを付記し、ここに謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) Fukushima, S. and Ishi-i, T. : An experimental Study of the Influence of Confining Pressure on Permeability Coefficients of Filled Core Materials, Soils and Foundations, Vol.26, No.4, pp.32~46, 1986.
- 2) Carpenter, G.W. and Stephenson, R.W. : Permeability Testing in the Triaxial Cell, Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol.9, No.1, pp.3~9, 1986.
- 3) 当山道三：土質力学（第19版），第6.6節，円筒放射形透水試験機，pp.101~102, 1976.
- 4) Taylor, P.W. : Fundamentals of Soil Mechanics, pp.114~117, John Wiley & Sons Inc. 1966.
- 5) Samarasinghe, A.M., Huang, Y.H. and Drenevich, V.P. : Permeability and Consolidation of Normally Consolidated Soils, Proc. of ASCE. Vol.108, GT-6, pp.835~858, 1982. (1991.7.2 受付)

## MEASUREMENT METHOD OF HORIZONTAL AND VERTICAL PERMEABILITIES OF DEEP UNDERGROUND IN TRIAXIAL CELL

Shinji FUKUSHIMA, Yoshitoshi MOCHIZUKI and Kazuo KAGAWA

In order to investigate that a triaxial chamber can be used to measure the permeability of borehole samples obtained from the deep underground, a series of permeability tests in triaxial cell was performed on reconstituted sand samples and boreholes samples. Test results indicate that the method in this study seems to be suitable to measure the permeabilities of vertical and horizontal directions of borehole samples.