室内透水試験法について

高橋 学*・張 銘**・江崎 哲郎***・坂井健太郎****

1. はじめに

透水特性は地層の重要な性質の一つである。地層の透水特性の評価は単なる地下資源の開発と関連があるだけでなく、土木工学や環境工学、そして地下空間利用などにおける多くの問題に関わりがあり、非常に重要なことである。例えば、地下流体資源(地下水・天然ガス・石油など)の開発、アースダムおよびその基礎地盤中を通じる浸透、地下水面下に設けられた基礎に作用する揚応力、地滑りや斜面の安定に係わる浸透流などの決定、路盤の排水や凍結工法などの設計、地下水位以下の地盤を掘削する場合の排水工法の選択と設計、汚染された地下水の移動や地盤沈下など、すべての問題は基本的に地盤の透水性に左右されるものである。地層の透水特性の特徴は以下のとおりである。

(1) 地層の透水係数は材料の他の物性値に比べかなり広範囲に変化する。金属の強度が粘土の 10^5 倍程度であるのに対し、一般的に地層材料の透水係数は砂礫から粘土層およびインタクトな岩まで $10^1 \sim 10^{-9}$ cm/s以下であり、その変化は 10^{10} 倍以上にも及ぶ。さらに、地層の異方性および非均一性により、同一地層の透水特性が大きく変化することもある。

(2) 地層の透水特性はその力学的特性に密接に関係している。従来、土質力学において強度・変形および透水特性の3つの特性は有効応力によって理論的に関連づけられてきた。例えば、荷重による排水条件で圧密が行われる場合、土の変形速度はその透水性に大きく左右される。有効応力原理より土の強度や安定性を評価する場合、間隙水圧の消

散と有効応力の増加が強度の増加を決定する。これは、間隙水圧の消散が土の排水状態・圧縮性および透水性に直接左右するためである。また、動的安定性あるいは振動による非粘性土の液状化の実験的研究から、地層の透水性が高いほど、液状化しやすいことが明らかとなっている。

(3) 自然状態の地下水の流れはほとんどの場合層流であり、また動水勾配も比較的小さい。DUNNら¹⁾の報告によれば、一般的に地下水の動水勾配は1よりも小さく、バリアの中でもほとんどの場合20より大きくならない。また、Urishら²⁾が平坦な地域では動水勾配は 10^{-4} 程度と小さいことを報告している。地層の代表的な水理学的常数を室内の透水試験によって求めるためにはなるべく現位置の状況に近い低動水勾配のもとで透水試験を行う必要がある。

以上の特徴、そして時代の発展に伴って考案されてきた様々な地下開発および地下利用に要求された透水特性への計測要求から、各種透水試験法およびその理論が発展してきているが、本稿では、室内透水試験法およびその最新理論について概括してみたい。

2. 透水試験法

透水特性を評価する室内試験法は、透水試験装置および透水特性の評価法によって分類される。

透水試験装置は、透水円筒を用いた剛性側面透水装置(Rigid-wall permeameter)と三軸圧力室を用いた柔軟性側面透水装置(Flexible-wall permeameter)に分けられる³⁾。剛性側面法は装置および供試体の作製が簡単で、試験が容易に行われる。しかし、供試体の外側と透水円筒との間を完全に密閉することが難しく、その間に側面流が生じる可能性がある。一方、柔軟性側面法は、側面流の影響を最小限にするだけでなく、封圧による有効応力の制御や供試体の体積変化の測定等の点で優位性を持つ。一般的には側面流および有効応力などの制御ができるという点から、柔軟性側面法が透水特性を評価する方法としてふさわしいと言われている⁴⁾。

* 地質調査所環境地質部 Environmental Geology Department, GSJ(会員) E-mail: g8906@gsj.go.jp

** 地質調査所環境地質部 Environmental Geology Department, GSJ

*** 九州大学工学部 Faculty of Engineering, Kyushu University(会員)

**** 九州大学大学院 Graduate School of Kyushu University

透水性を評価する方法は、直接試験法と間接試験法に分けられる。間接的方法は、地盤や岩盤材料の構造、例えば土の粒度分布から透水係数を推定するものと圧密試験から計測するものがある⁶⁾。粒度分布から透水特性を評価する方法は、粒径が比較的均質なもの(砂岩、砂や礫)に対して有効である^{6),7)}。しかし、ち密な岩石や細粒土に対しては透水性を正確に評価することは難しい。これは透水特性は空隙率だけに関連するのではなく、空隙の形状やその間の連結性などにも大きく依存するためである^{8)~10)}。LAPIERREら¹¹⁾は、Louiseville 粘土の水銀圧入と透水試験の研究より、粒度分布からは細粒土の透水性を正確に評価できないと結論している。圧密試験で透水特性を評価する方法は基本的には、土のような強度の比較的低いものにしか適用できない。

透水係数を直接的に計測する試験法は主に定水位法、変水位法¹²⁾、トランジェントパルス法¹³⁾およびフローポンプ法^{14),15)}がある。そのほか、遠心力透水試験法(Centrifugal Technique)^{16),17)}および間隙水圧振動試験法(Oscillating Pore Pressure Method)^{18),19)}なども提案されているが、未だ一般的な手法として用いられていない。一般的に、定水位法は比較的高い透水係数の供試体($10^{-2} \sim 10^{-3} \text{ cm/s}$)に用いられ、変水位透水試験は比較的低い透水係数の供試体($10^{-3} \sim 10^{-6} \text{ cm/s}$)に用いられている¹²⁾。トランジェントパルス法およびフローポンプ法はさらに低い透水係数($< 10^{-8} \text{ cm/s}$)の供試体を試験することができ、難透水性材料に適した試験法である。次節では、透水特性を直接的に計測する各種試験法の理論について述べる。

3. 透水試験理論の進展

3.1 定水位法

定水位透水試験法の概略図をFig. 1に示す。この試験は供試体に一定の水位差を与え、単位時間あたりの透水量 q を測定し、下記のダルシー式から透水係数 K を算出するものである。

$$K = \frac{q}{At} \cdot \frac{L}{\Delta H} \quad (1)$$

Fig.1 Schematic of constant head permeability test apparatus.

ここで、 t は計測時間、 ΔH は供試体間の一定の差圧、 L は供試体の高さ、 A は供試体の断面積、 $\Delta H/L$ は動水勾配である。

定水位法は簡単で、試験が容易に行われるため、多くの研究者が難透水性材料の透水試験のため、定水位透水試験装置の改良を行っている。主な改良点は水の流出および流入量を圧力ビュレットにより計測し精度を高めることである。より短時間で流量の計測を行うため、動水勾配を数十から数百、ときには1000を越える条件で実施した例もある²⁰⁾。しかし、動水勾配を非常に高くした場合、浸透で圧密現象や乱流が発生し、また粒子の移動で間隙の目詰まりや浸食を起こすため計測した透水係数は実際のものと著しく異なることが指摘されている¹⁾。

一方、低い動水勾配条件で透水試験を行う場合、計測に非常に長い時間が必要となり、実用性および信頼性に問題がある²¹⁾。低い動水勾配を制御することおよび小さい流量を計測することは技術的に限界があり、また、試験中の環境温度の変化による試験装置自体の変形等による実験的誤差が発生する。さらに、計測が長期間に及ぶことから、バクテリアの成長や浸透中の間隙水の化学的变化などが実験にも誤差を与える。したがって、定水位法で難透水性材料の透水試験を行う場合、この動水勾配と試験時間の問題は避けられないことである。

定水位法を難透水性材料の透水試験に用いる場合、その適切さを定量的に評価するため、著者ら²²⁾は定水位法の厳密解析理論を導いた。定水位透水試験における供試体中の水頭分布 $H(Z, t)$ および動水勾配分布 $i(Z, t)$ はそれぞれ以下の2つの式で表される。

$$H(Z, t) = \Delta H \left\{ \frac{Z}{L} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n\pi)}{n} \cdot \sin \frac{n\pi Z}{L} \cdot \exp \left(-\frac{K}{S_s} \cdot \frac{n^2 \pi^2}{L^2} t \right) \right\} \quad (2)$$

$$i(Z, t) = \frac{\Delta H}{L} \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos(n\pi) \cdot \cos \left(\frac{n\pi Z}{L} \right) \cdot \exp \left(-\frac{K}{S_s} \cdot \frac{n^2 \pi^2}{L^2} t \right) \right\} \quad (3)$$

ここで、 S_s は比貯留率、 Z は供試体の上端面(水の流出側)からの距離である。また、水の流出側の流量 $q(0, t)$ および流入側の流量 $q(L, t)$ は次のように表される。

$$q(0, t) = \frac{K \cdot A \cdot \Delta H}{L} \cdot \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot \exp \left(-\frac{K}{S_s} \cdot \frac{n^2 \pi^2}{L^2} t \right) \right\} \quad (4)$$

$$q(L, t) = \frac{K \cdot A \cdot \Delta H}{L} \cdot \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp \left(-\frac{K}{S_s} \cdot \frac{n^2 \pi^2}{L^2} t \right) \right\} \quad (5)$$

以上の定水位法の厳密解析理論を用い、シミュレーションした結果の一例をFig. 2, 3に示す。Fig. 2によれば、供試体の一端(水の流入側)に一定の水頭を与えることによって、その付近の供試体中の水頭が急激に増加していくとともに極めて大きい動水勾配が発生する。この大きい動水勾配は透水時間の経過につれ徐々に減少し、最終的には定常状態に至る。しかし、供試体の透水係数が小さい場合、定常状態に至るまでに相当長い時間が必要となる。また、

Fig.2 The hydraulic head and hydraulic gradient versus time curves simulated for a constant head test.

Fig.3 Simulated inflow and outflow for the constant head test.

Fig. 3に示しているように定常状態の流量は極めて小さいため、定常状態の判断も非常に困難である。非定常状態の流入流量と見かけの動水勾配(一定の水頭差/供試体全長)を用いて通常よく用いられているダルシー則で透水係数を評価すれば、透水係数を大きく見積もることになるであろう。

3.2 変水位法

変水位試験法の概略図をFig. 4に示す。透水試験はある時間内で流体が供試体を浸透することによるスタンドパイプの水位の低下とそれに伴う圧力の変化を測定するものである。スタンドパイプ内の流体の減少がすべて供試体に浸透し、微小時間におけるダルシー則が適用されると仮定することにより透水係数を次式から算出する。

$$K = 2.30 \frac{aL}{At} \log_{10} \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (6)$$

ここで、 a はスタンドパイプの断面積、 h_1 および h_2 はそれぞれスタンドパイプの始めの水位と最後の水位である。変水位法も水量を直接に計測し透水特性を評価するため、難透水性材料に適用する場合、定水位法と同様に短時間で計測するためには高い動水勾配が必要となる。また、透水係数の極めて小さい供試体の場合、水位の低下が非常に少ないため、定水位法の式(1)で透水係数を求めるのがほとんどである。

3.3 フローポンプ法

Fig. 5にフローポンプ透水試験法の概略図を示す。この方法は、供試体に流入あるいは流出する流体を外部から制御し、それに起因する供試体間の水頭差を計測することによって透水係数を求めるものである。この試験方法の特徴は、前述した定水位法および変水位法が圧力を一定に制御または変化させ、微流量の計測を行い透水係数を求めたのに対し、フローポンプ法は微小流量を一定に制御し、圧力を直接計測することにより、試験を容易にかつ精度よく実施できることである²³⁾。例えば、 $10^{-7} \text{ cm}^3/\text{s}$ 程度の流量であれば、市販されているシリンジポンプでも可能である^{24), 25)}。それに対して、現在の技術レベルから流体の体積計測の分解力は 10^{-3} cm^3 であるため、難透水性供試体の透水試験に

Fig.4 Schematic of falling head permeability test apparatus.

Fig.5 Schematic of flow pump permeability test apparatus.

おける微流量の計測には非常に長い時間を必要とする。また、現在圧力計の計測精度が 10^{-3} PSI(6.9Pa)であるのに対して、圧力の制御精度は 10^{-1} PSI(690Pa)である。すなわち、流量に対しては微流量の発生は計測より遙かに容易であり、一方、圧力に対しては計測は制御より遙かに容易である²⁶⁾。

従来では、フローポンプ透水試験において透水係数を定常状態の計測結果を用いて式(1)より求めてきた。そこで、 q と ΔH はそれぞれフローポンプの一定流量と定常状態における供試体両端間の水頭差の計測値を代入する。しかし、供試体の透水係数が極めて小さい、または供試体の非貯留率およびフローポンプ透水装置自身の圧縮貯留率が比較的大きい場合、定常状態に至るまで比較的に長い時間を要する。また、その定常状態の判断も困難である。難透水性土質材料の透水係数を早期の計測結果から速く求めるため、MORINら²⁷⁾が装置の貯留特性を考慮していない理論解を求めた。しかし、その解はフローポンプ装置の貯留率が供試体のそれと比べて無視できる場合のみしか適用できないため、実用までには至らなかった。この問題を解決するため、ESAKI *et al.*²⁸⁾、張ら²⁹⁾は供試体と装置の貯留率の両方を考慮したフローポンプ透水試験の非定常状態を忠実に評価できる厳密解を確立しており、次式より表される。

$$H(Z,t) = \frac{qL}{AK} \cdot \left\{ \frac{Z}{L} - 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\exp\left(-\frac{K}{S_s} \beta_n^2 t\right) \sin(\beta_n Z)}{L \delta \beta_n \cos(\beta_n L) \left[L \left(\beta_n^2 + \frac{1}{\delta^2} \right) + \frac{1}{\delta} \right]} \right\} \quad (7)$$

ここで、 $\delta = C_e / (AS_s)$ 、 C_e はフローポンプの貯留率であり、単位圧力あたりの増加によるフローポンプシステム中に圧縮された水の体積と定義されている。また、 β_n は下記の方程式の根である。

$$\tan(\beta L) = 1/(\beta \delta) \quad (8)$$

実際の透水試験時では供試体両端間の水頭差を計測する

ため、式(5)に $z=L$ とし、また、 $\tan \beta_n$ が式(6)を満たすという条件を利用すると、次式(7)のように簡略化される。

$$H = \frac{qL}{AK} \left\{ 1 - 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\exp\left(-\frac{K}{S_s} \beta_n^2 t\right)}{L \delta^2 \beta_n^2 \left[L \left(\beta_n^2 + \frac{1}{\delta^2} \right) + \frac{1}{\delta} \right]} \right\} \quad (9)$$

上式は時間 $t=0$ の時、水頭差 $H=0$ となり実験の初期条件を満たしている。また、時間を長くすると($t=\infty$)ダルシー式と等しくなる。さらに、フローポンプの貯留率を無視する場合($C_e=0$, $\delta=0$)、方程式(8)の根は $(2n+1)\pi/2L$ となり、上式はフローポンプ法を提案したOLSENら²⁷⁾が確立した式と等しくなる。

$$H = \frac{qL}{AK} \left\{ 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\exp\left(-\frac{K}{S_s} (2n+1)^2 \pi^2 / 4L^2\right)}{(2n+1)^2} \right\} \quad (10)$$

式(7)をさらに z に対して微分すれば、供試体中の動水勾配は次式により求められる。

$$i(Z,t) = \frac{qL}{AK} \cdot \left\{ \frac{1}{L} - 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\exp\left(-\frac{K}{S_s} \beta_n^2 t\right) \cos(\beta_n Z)}{L \delta \cdot \cos(\beta_n L) \left[L \left(\beta_n^2 + \frac{1}{\delta^2} \right) + \frac{1}{\delta} \right]} \right\} \quad (11)$$

張ら²⁹⁾はこのフローポンプ透水試験の厳密解析理論を用い、低レベル放射性廃棄物地層処分施設に隔離材料として使用されるベントナイト混合土のせん断変形中における水理学的特性の変化を求めた。その結果、フローポンプ透水試験の厳密解析理論により、早期の計測結果から供試体の水理学的常数を正確に求められることが明らかになった。フローポンプ透水試験の解析結果の一例をFig. 6に示す。供試体中の水頭差は徐々に増加し、それに伴い動水勾配も徐々に増加していく。最終的に試験は定常状態となり、この状態では供試体中の水頭差の分布は線形となり、供試体の全長にわたって動水勾配は一定となり、その最大値に至る。供試体の常数は固有のものであるため、式(11)により動水勾配の最大値はフローポンプの流量の設定により制御できる。そのため、フローポンプ法により実際の現場状況に近い低動水勾配の条件下で透水試験が可能となり、高い動水勾配に生じた圧密現象等の悪い影響を除去することができるようになり、結果として信頼性の高い水理学的常数を求めることができると考えられる。

3.4 トランジェントパルス法

BRACEら¹³⁾は、Westerly花崗岩の透水特性を計測するためトランジェントパルス法を提案した。この装置は円柱形の岩の供試体とそれに連結した2つの貯留容器からなる(Fig. 7)。試験方法は、岩石供試体に間隙水圧を加えた状態から、片方の貯留容器に急激に圧力パルスを与える。流体は加圧した貯留容器から徐々に供試体を通り他方の容器へ浸透し、同時に加圧した容器内の圧力は徐々に減少する。透水係数は供試体に連結した貯留容器の水圧の経時的

Fig.6 Hydraulic head and hydraulic gradient changes within the specimen in flow pump permeability test.

Fig.7 Transient pulse technique.

変化から求める。BRACEらが行ったトランジェントパルス法の理論解析は、岩石供試体自身の圧縮による貯留を無視したものである。この解析は容器1の圧力 P_1 の圧力減少による指数関数から得られる。

$$P_1 - P_f = H \cdot \frac{V_d}{V_u + V_d} \cdot e^{-\theta t} \quad (12)$$

ここで、

$$\theta = (KA/\gamma_w \lambda L)(1/V_u + 1/V_d) \quad (13)$$

V_u と V_d はそれぞれ上流および下流側貯留槽の容積、 P_f は圧力の収束値、 H は圧力パルス、 γ_w は流体の比重、 λ

は流体の圧縮性である。

透水係数は試験から得られた時間経過に伴い指数関数的に減少する圧力 ($P_1 - P_f$) のグラフの傾き $-\theta$ から式(13)より算出する。圧縮貯留性を考慮していないこの仮定は、ある特定の結晶質岩にとって合理的であるが、多孔性で圧縮貯留性の富む岩種にとっては適当でない。そのため、Hsiehら³⁰⁾が岩石供試体自身の圧縮貯留特性を考慮したトランジェントパルス法の厳密解析理論を導いた。Hsiehらの手法では、上下流貯留槽の圧力の変化から供試体の透水係数のみならず、供試体の比貯留率も評価できるようになった。しかし、試験中に供試体中の水頭分布および動水勾配の変化については未だ評価されていない。

供試体中の水頭分布の経時変化は次式で表される一般解より評価できる³⁰⁾。

$$\frac{h(Z,t)}{H} = \frac{1}{1+\beta+\gamma} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\exp\left(-\frac{Kt}{L^2 S_s} \phi_m^2\right) \left[\cos\left(\phi_m \frac{Z}{L}\right) - \left(\frac{\gamma \phi_m}{\beta}\right) \sin\left(\phi_m \frac{Z}{L}\right) \right]}{\left(1+\beta+\gamma - \frac{\gamma \phi_m^2}{\beta}\right) \cos \phi_m - \phi_m \left(1+\gamma + \frac{2\gamma}{\beta}\right) \sin \phi_m} \quad (14)$$

ここで、

$$\xi = \frac{x}{L}, \quad \alpha = \frac{K_t}{L^2 S_s}, \quad \beta = \frac{S_s AL}{S_u}, \quad \gamma = \frac{S_d}{S_u}$$

また、 S_u および S_d はそれぞれ上下流貯留槽の貯留率、 ϕ_m は次に方程式の根である。

$$\tan \phi = \frac{(\gamma+1)\phi}{\gamma \phi^2 / \beta - \beta} \quad (15)$$

式(14)をさらに Z に対して微分すれば、供試体中の動水勾配は次式により求められる。

$$\frac{i(Z,t)}{H} = 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\phi_m}{L} \cdot \frac{\exp\left(-\frac{Kt}{L^2 S_s} \phi_m^2\right) \left[\sin\left(\phi_m \frac{Z}{L}\right) - \left(\frac{\gamma \phi_m}{\beta}\right) \cos\left(\phi_m \frac{Z}{L}\right) \right]}{\left(1+\beta+\gamma - \frac{\gamma \phi_m^2}{\beta}\right) \cos \phi_m - \phi_m \left(1+\gamma + \frac{2\gamma}{\beta}\right) \sin \phi_m} \quad (16)$$

式(14)および(16)を用いてシミュレーションしたトランジェントパルス透水試験の一例をFig. 8に示す。この図より、上流側の供試体中には水頭が急激に上昇しその後徐々に低下する。一方、下流側の供試体中には水頭が徐々に増加していく。それとともに上流側の供試体の端面に極めて大きい動水勾配が発生し、その後供試体中の最大動水勾配は供試体を渡って下流側の供試体の端面へ遷移する。しかし、供試体中の最大動水勾配は透水時間の経過とともに減少していく。最終的には0の値に近づき、上下流の貯留槽および供試体中では一定の圧力になっていく。WANGら³¹⁾はトランジェントパルス透水試験における透水係数および比貯留率の最適評価は圧力パルスが迅速に低下する部分の結果より行うことを提案しているが、そのとき供試体中に発生する動水勾配は比較的大きい。また、動水勾配の値も

Fig.8 Simulated hydraulic head and hydraulic gradient within the specimen for the transient pulse permeability test.

急激に変化している。そのため、WANG らの提案のとおりで求めた供試体の水理学的常数の信頼性には疑問がある。実際の現場に近い動水勾配のもとで透水特性を評価するためには、圧力パルスをできるだけ小さくする必要がある。したがって、透水試験開始直後の動水勾配の極めて高い状態の計測結果を利用しない方がよいであろう。

4. お わ り に

地盤環境および環境保全の立場からみた各種地下施設、とくに地下貯蔵や廃棄物地層処分施設などの安全基準はほとんどの場合地層の透水特性に支配されるものであると考えられる。そのため、地層の透水特性を正確に評価することは地盤や岩盤を利用した様々なプロジェクトを安全かつ

経済的に建設するためには必要不可欠となっている。本稿では、現在よく用いられている各種室内透水試験法およびその理論の発展について概括した。しかし、それらの理論はすべて完全飽和状態の供試体にしか正確に適用できない。実際の現場では、完全に飽和されていない場合もあると考えられ、今後は不飽和浸透流、あるいは二相流浸透や透気試験理論の確立などが課題として挙げられる。

引用文献

- 1) DUNN, R. J. and MITCHELL, J. K. (1984): Fluid Conductivity Testing of Fine Grained Soil, *J. Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers*, Vol.110, No.11, pp.1648-1665.
- 2) URISH, D. W. and O'REILLY, M. J. (1992): Tracking Multiple Pollution in a Coastal Aquifer, Cape Cod National Seashore, Provincetown, Massachusetts, *Transactions American Geophysical Union*, (abs.) Eos Fall Meeting Supplement, Vol.73, 190p.
- 3) DANIEL, D. E., ANDERSON, D.C. and BOYNTON, S.S. (1985): Fixed-wall versus flexible-wall permeameters, Hydraulic barriers in soil and rock, *American Society for Testing and Materials, Special Technique Publication 874*, pp.107-126.
- 4) BLACK, D. K. and LEE, K. L. (1973): Saturating laboratory samples by back-pressure, *ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, 99: pp.75-93.
- 5) HEAD, K. H. (1980): Permeability, shear strength and compressibility tests, *Manual of Soil Laboratory Testing*, Vol.2, 747p.
- 6) LOUDON, A. G. (1952): The computation of permeability from simple soil tests, *Geotechnique*, Vol.3, pp.165-183.
- 7) KENNEY, T. C., LAU, D. and OFOEGBU, G. I. (1984): Permeability of compacted granular materials, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.21, pp.726-729.
- 8) GARCIA-BENGOCHEA, I. and LOVELL, C.W. (1981): Correlative measurements of pore size distribution and permeability of soils, *Permeability and ground water contaminant transport*, *American Society for Testing and Materials, Special Technical Publication 746*, pp.137-150.
- 9) JUANG, C. J. and HOLTZ, R. D. (1986): Fabric, pore size distribution and permeability of sandy soils, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.112, pp.855-868.
- 10) CHAPUIS, R. P. (1990): Sand-bentonite liners: predicting permeability from laboratory tests, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.27, pp. 47-57.
- 11) LAPIERRE, C., LEROUILL, S. and LOCAT, J. (1990): Mercury intrusion and permeability of Louiseville clay, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.27, pp.761-773.
- 12) 土質工学会 (1980): 土質試験法, 757p.
- 13) BRACE, W. F., WALSH, J. B. and FRANGOS, W. T. (1968): Permeability of granite under high pressure, *J. Geophys. Res.* Vol.73, pp.2225-2236.
- 14) OLSEN, H. W. (1965): Deviations from Darcy's law in saturated clays, *Soil Science Society of American Proceedings*,

- Vol.29, No.2, pp.135-140.
- 15) OLSEN, H. W., MORIN, R. H. and NICHOLS, R. W. (1985): Flow pump applications in triaxial testing. *Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock*, Donaghe, R. T., Chaney, R. C., and Silver, M. L. Eds., ASTM STP 977, Philadelphia, pp.68-81.
 - 16) RRBIN, J., HAMMERMEISTER, D. P. and NIMMO, J. R. (1987): Method and apparatus for steady-state measurement of liquid conductivity in porous media, U.S. Patent 4,679,422, U. S. Patent and Trademark off., Arlington, Va.
 - 17) NIMMO, J. R. and MELLO, K. A. (1991): Centrifugal techniques for measuring saturated hydraulic conductivity, *Water Resources Research*, Vol.27, No.6, pp.1263-1269.
 - 18) BENNION, D. W. and GOSS, M. J. (1971): A sinusoidal pressure response method for determining the properties of a porous medium and its in-situ fluid, Soc. Petrol. Engng, paper SPE 3541.
 - 19) KRANZ, R. L., SALTZMAN, J. S. and BLACICI, J. D. (1990): Hydraulic diffusivity measurements on laboratory rock samples using an oscillating pore pressure method, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol.27, No.5, pp.345-352.
 - 20) WONG, L. C. and HAUG, M. D. (1991): Cyclical closed-system freeze-thaw permeability testing of soil liner and cover materials, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.28, pp.784-793.
 - 21) OLSEN, R. E. and DANIEL, D. E. (1981): Measurement of the hydraulic conductivity of fine-grained soils, Permeability and ground-water contaminant transport, American Society for Testing and Materials, Special Technical Publication 746, pp.18-64.
 - 22) ESAKI, T., ZHANG, M., TAKAHASHI, M. and SAKAI, K. (1997): Evaluation of the flow pump and constant head techniques when testing low permeability geotechnical materials, *Proceedings of the 28th Symposium of Rock Mechanics*, Tokyo, pp.251-257.
 - 23) OLSEN, H. W., et al. (1991): Innovations in hydraulic-conductivity measurements, *Transportation Research Record*, No.1039, pp.9-17.
 - 24) HARVARD APPARATUS (1991): Syringe and peristaltic pumps (Catalog), 107p.
 - 25) SCO: Precision syringe pumps, Programmable, pulseless fluid metering (Catalog).
 - 26) ALVA-HURTADO, J. E. and SELIG, E. T. (1981): Survey of laboratory devices for measuring soil volume change, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.4, No.1, pp.11-18.
 - 27) MORIN, R. H. and OLSEN, H. W. (1987): Theoretical analysis of the transient response from a constant flow rate hydraulic conductivity test. *Water Resources Research*, Vol.23, No.8, pp.1461-1470.
 - 28) ESAKI, T., ZHANG, M., TAKESHITA, A. and MITANI, Y. (1996): Rigorous Theoretical analysis of a flow pump permeability test, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.19, No.3, pp.241-246.
 - 29) 張 銘・高橋 学・江崎 哲郎 (1997): フローポンプ透水試験法における非定常解について, 北海道応用地学合同研究会論文集, No.8, pp.111-116.
 - 30) HSIEH, P. A., TRACY, J. V., et al. (1981): A transient laboratory method for determining the hydraulic properties of 'tight' rocks-I, Theory. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.18, pp.245-252.
 - 31) WANG, H. F. and HART, D. J. (1993): Experimental error for permeability and specific storage from pulse decay measurements, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.30, No.7, pp.1173-1176.

(1997年 9 月 3 日受付, 1997年12月 2 日受理)

On Laboratory Permeability Test Methods

Manabu TAKAHASHI, Ming ZHANG, Tetsuro ESAKI and Kentaro SAKAI