不攪乱粘土試料の水平方向透水係数の測定方法

石田 哲朗*・赤木 俊允*

Measurement of the Horizontal Permeability of Undisturbed Clay

Tetsuro ISHIDA*・Toshinobu AKAGI*

ABSTRACT

A new horizontal permeability test is proposed. The apparatus for the permeability test has been developed on the basis of the consolidation cell devised by Rowe and Barden.(1966).

The size of the soil specimen is 20cm in diameter and 6.7cm thick. A rubber jack is placed over the spacer disc and is fed with water connected with the constant pressure supply line through a valve in the cell cover, applying to the soil specimen a uniform pressure up to approximately 5kgf/cm². Vertical compression of the specimen is indicated by a hollow stainless steel spindle attached to the rubber jack and passing through the cell cover. The compression is measured by means of a dial gauge mounted on a bracket on the cover.

Two slits are opened, diametrically opposite, on the side of the oedometer ring. Water under constant pressure is supplied through the side slits and fed into the soil specimen to establish steady seepage across it in the horizontal direction. The seepage thus obtained makes it possible to compute the coefficient of horizontal permeability at the end of each loading.

The vertical permeability of a clay specimen cut to the initial size of 15cm in diameter and 4 cm in thickness was measured also in a Rowe-type consolidometer capable of flowing water vertically through the specimen under a constant head. Direct measurement of the vertical permeability was made at the end of each loading of the consolidation test.

Under relatively low consolidation pressures the seepage quantities both in the vertical and horizontal directions are approximately of the same magnitude, while with increase in the applied vertical pressure the flow in the vertical direction decreases more markedly than that in the horizontal direction. Therefore, it is considered that as consolidation proceeds the soil structure become more oriented in the horizontal direction, causing water to flow more readily in the horizontal direction and resulting in more distinct anisotropic permeability. Comparison was made between the values of the coefficient of permeability determined from the proposed permeability tests and from the oedometer tests. The values from the former were significantly greater than those from the latter. It is also noted that the coefficient of permeability increases as the size of specimens increases.

* 東洋大学工学部土木工学科

1 まえがき

粘土地盤の圧密解析を行う際、従来は、Terzaghiの一次元圧密理論により、その変形と透水に関係する係数は圧密係数 c_v として一つの定数の中で取り扱われて来た。しかし、Biotの方程式を基礎とした多次元圧密解析では(田村、1978; 大西・村上、1980; 荒井ほか、1983)、変形に関する係数と透水に関する係数は別々に取り扱わなければならない、特に圧密の進行速度を支配する透水係数を単独に計測する必要性が生じている。厳密に圧密時間を予測するには、間隙比の変化による透水係数の変化等の計測データが必要である。

また、実際の軟弱地盤では、サンドドレーンやブレファブ・ドレーン等の圧密促進工法を用いて施工することが多い。このような条件での透水の方向は水平方向である。したがって、この現象を解析するには、水平方向の透水係数を的確に計測する必要がある。

このような考え方は、従来より多くの研究者達によって指摘されており(Rowe、1959; 風間ほか、1981)、シンウォールサンプラーで採取した試料の水平方向の圧密試験を行って、その水平方向の圧密係数ならびに透水係数を求めて来た。

しかし、図-1(b)に示すように、供試体を水平方向に圧密して、その透水係数を求める方法は、土構造の配向構造が異なり、それより得られる透水係

図-1 粒子構造と圧密・排水条件の違い

Fig. 1 Oriented structure, consolidation directions and drainage condition

数と間隙比の間隔も図-1(a)のような実際の現象とは異なると考えられる。なお、図-1(c)は普通に行われる圧密試験の切り出し方を示す。

本報告では、上記の観点より、実際の圧密沈下現象に即した条件下で、粘土供試体の水平方向の透水係数を室内実験より求める方法を提案する。まず、水平方向透水係数の必要性を示すとともに圧密透水試験機においての载荷の初期段階のデータの正当性を確認することも含めて、不攪乱粘土の透水性について検証実験を行う。その上で提案する試験法より得られた実験結果を評価し、従来の圧密試験より求めた結果と比較したものについて論述する。

2 試験装置と方法の説明

本報告で提案する圧密透水試験装置を図-2に示す。この装置の原型はRowe & Barden (1966)の提案した圧密試験機にある。試料寸法は地盤の不均質性を考えると、大きいほどよいのであろうが実験での簡便さとサンプリングでの品質確保の上から直径20cm、高さ6.7cmとした。成形した試料の切出し方向は、図-1(c)に示す通りである。

図-2 圧密透水試験機

Fig. 2 Schematic diagram of the consolidation-permeability apparatus(horizontal permeability)

試料への加圧は生ゴム製の水圧制御式ゴムジャッキにより与える。最大圧密応力は 5 kgf/cm^2 まで加えることができる。沈下量は中央の軸上に取り付けられたダイヤルゲージから読み取る。特異なところは、図-3に示す排水バルブが2組4箇所にて設けてあることで、これらは円形断面で直径の両端に位置す

る。試料の接する面には、幅1.5mmの溝が、高さ方向に60mmつけてあり、鉛直荷重によって、そのスリットから試料が押し出されないように、裏面には銅合金製の通水板が配してある。透水試験を行う場合はこの排水口的一方から浸透させ、直径方向に位置するバルブからの一定時間内の浸透水量を計測

図-3 排水装置の詳細図

Fig. 3 Side slits for drainage

図-4 圧密透水試験機 (鉛直方向へ通水)

Fig. 4 Schematic diagram of the consolidation-permeability apparatus (vertical permeability)

する。水頭は図-2中に示したコンプレッサー・システムによって、定水位型の高い水頭を作用させることができる。

また、後述する圧密応力下における異方透水性の比較試験では、図-4に示すように試料の上下面にストレーナ付きディスクを介らせて鉛直方向に送る浸透水の分散、集水を平易にさせ、種々の圧密応力下での鉛直方向の透水係数を測定した（供試体寸法直径15cm、高さ4cm）。つまり図-2、図-4に示す圧密試験機は、それぞれ水平方向、鉛直方向透水係数を測定するためのものである。

透水試験は各荷重段階で新たな荷重を加える前に実施する。それに費やす時間となると一概に定めることはできない。初期の段階では、2m程度の水頭差で容易に測定することができるが、荷重が増すにつれて高い水頭を与えないと測定がしにくくなることが図-5の結果から分かる。このように浸透水圧が高いときには、目詰まり現象が現われることが懸念されるが、試料を破壊しないように徐々に水頭を上げて計測する。

圧密試験の荷重増加率、載荷時間は標準圧密試験と同様に倍増ステップ載荷、24時間である。この便宜上定められた載荷時間を採用した理由としては、図-6に示した一例のように沈下ひずみと時間の関係は、これまでの報告（網干・松田、1981）と同様に試料が厚いほど一次圧密が終了するまでに時間がかかり垂直ひずみも増大する傾向にはあるが、一次圧密は、この程度の試料の場合にも24時間以内には終了することが分かる。したがって、二次圧密の影響

図-5 浸透水量と時間の関係

Fig. 5 Seepage versus elapsed time

を排除することにはならないが、室内における数cmの粘土を用いて24時間程度の短期間の載荷試験を行ったときの読みが、実際問題として10mを越えるような粘土層の100%圧密に相当する沈下量に近い値を示す結果になる、という誤差の緩和も期待して慣例の載荷時間を採用することにした。

次に水平方向透水係数を求める方法について述べる。試験機のもつ形状から透水係数 k_h (cm/sec) と単位奥行き当たりの流量 Q (cm²/sec) との関係は次式で表すことができる

$$k_h = a \frac{Q}{\Delta h} \quad (1)$$

図-6 鉛直ひずみと時間の関係

Fig. 6 Time-settlement curves for different sizes of specimen

図-7 試験機の性状

Fig. 7 Relation between $Q/\Delta h$ and k_h

α の値は、境界条件に対する透水場のフローネットを描いて求められる定数 (N_d/N_f) であり、本報の場合は差分等の解析結果から、図-7に示す関係が得られている (赤木・石田、1988)。ここに、等ポテンシャル線によって仕切られた区画数を N_d 、流線によって仕切られた区画数を N_f とし、 Δh は損失水頭を表す。

ところで、ここで提案する試験機のような浸透条件をもつ場合には、粘土試料内の流れよりも圧密リング側面に沿った流れの方が卓越するのではと考える向きもあるが、成形した直後や初期の荷重段階ではともかく、鉛直荷重の増加に伴ない供試体側面はリングの内面に押しつけられる上に、摩擦も働き強く密着していることが考えられる。同様に後述するサンプリングチューブを用いた透水試験においても、ある圧密応力で堆積していた試料を、サンプリング操作によって地上に引き上げると、原位置における拘束圧に比べてサンプリングチューブ内の試料の拘束圧は低下し、試料は体積変化 (膨張) を生じてチューブ側面に密着する。粘性土の場合は、この「付着力」は相当に大きくチューブ側面に沿った流れが卓越すると懸念するには及ばない。

3 試験結果

3.1 原地盤の透水性

本章では、まえがきにおいても述べたように地盤の異方透水性についてと提案する試験法から得られるデータの正当性を確認することを目的に、実験に用いた不攪乱粘土試料の透水性について検証する。

不攪乱の粘土試料を採取して行う透水試験の例としては、ブロックサンプリングのように円筒を粘土地盤に圧入して不攪乱試料を採取し透水試験に用いるケースと、深さ方向に対して広範囲の水平方向の透水性を求めるために行う、シンウォール・チューブを圧入して採取した試料を用いる方法とがある (赤木・石田、1988)。普通、堆積面に対して鉛直方向の透水係数が測定されることが多いが、地層は本来、水平な層状に堆積したものであり、水平方向の透水性は鉛直方向のそれを上回ると指摘されている。本報の提案する内容から、ここでは、自然堆積した粘土地盤の水平方向の透水試験の結果について示すことにする。実験に使用した試料は埼玉県坂戸市越辺川河床から採取した不攪乱粘土で、その主

な土質定数を表-1に示しておく。

透水試験機はサンプラーを兼ねていて、図-8に示すように直径30cm、高さ35cmで肉厚3mmの鋼製の円筒である。円形断面の直径方向の両端には、直径2mmの小孔が5mm間隔で穿孔され、図-8に示したように直交する位置の4箇所 (A~D) に設けられている。通水はその小孔群を覆ったキャップ (一区間10cmで3区間) から等しい水圧が与えられ、図中のA→BまたはC→Dの方向へ浸透水を流して単位時間当たりの浸透水量を各区間ごとに計測する (これをS-試験とする)。また、同位置においてS-試験よりも深いところの粘土を、ピストンサンプラーを使用して採取したものについても透水試験を実施した (これをT-試験とする)。透水係数は

表-1 粘土の土質定数

Table 1 Soil properties

自然含水比 (%)	液性限界 (%)	塑性指数	湿潤密度 (t/m^3)	比重	間隙比	飽和度 (%)	圧縮指数	鋭敏比
55 60	60 65	32 35	1.63 1.65	2.67 2.72	1.60 1.71	98.8 100	0.5 0.6	3.9 5.8

図-8 サンプラーを用いた透水試験

Fig. 8 Horizontal permeability test

ともに式(1)の関係から求められる。

図-9には、浸透水量と計測時間の関係を表す一例を示す。地表面に近いところから順に#1～#3まで区分した各区間ごとの値を表している。水頭は1mである。ちなみに、このプロットされた点間の勾配から単位時間当たりの浸透水量が定められる。図から両端の区間の時間当たりの浸透水量は僅かのものであることが分かる。ここで、#1および#3の透水係数は $1 \sim 3 \times 10^{-7}$ cm/sec オーダーであり、#2は 2×10^{-6} cm/sec 程度であった。Terzaghi (1943)の示した平均水平方向透水係数の計算式にこれらの値を代入すれば、供試体全体の透水係数は最大値の影響を強くうけて 1×10^{-6} cm/sec 程度となる。

写真-1には、S-試験終了後に抜き出した試料を示す。木質の有機物質が完全に分解しないままで、断面内にかなりの割り合いで存在していることが確認できる。この均質を損なう存在は透水係数へ及ぼす影響が大きいと推測できる。

図-10には、水頭差と供試体全体の平均水平方向透水係数の関係を表した。粘土の透水試験を行う場合の水頭差に、新たな載荷圧によって生じる過剰間隙水圧の値を用いることも考えられる。したがって、水頭の変化による透水性への影響も把握する必要があると思われる。結果から、ここでの粘土では、水頭を5m (0.5 kgf/cm^2) 以上にとると1オーダーほど透水性が大きくなることが分かる。図中には図-8に示した記号(A→B、C→D)を用いた通水方向別の透水係数を示してある。

図-9 浸透水量と時間の関係

Fig. 9 Seepage versus elapsed time

次に、同位置で採取した試料を用いたT-試験の結果について検討する。図-11には10cm 区間ごとに測定された透水係数を示す。図-11には、また透水試験後に押し出して、切り出し方を変えて行った圧密試験から求められた透水係数をも示す。圧密試験

写真-1 不攪乱粘土

Photo 1 Undisturbed clay

図-10 水頭差と透水係数の関係

Fig. 10 Coefficient of permeability versus head of water

図-11 シンウォールチューブ内の透水係数の差異

Fig. 11 Coefficient of permeability of undisturbed clay in a thin-walled tube

に用いた試料のチューブ内の位置は図中に示した区間内にある。また、どの荷重段階の値を用いるかも問題となるが、先の透水試験の議論と同様に有効載荷圧と、切り出した試料と圧密リングとの密着の度合いを考慮して0.4kgf/cm²の結果を用いて比較することにした。一般に、圧密試験結果からは荷重が増加すると透水性も幾分低下した値が算出される傾向にある。

さて、図-11の結果はどのような試料でも10⁻⁹~10⁻⁷cm/sec程度の値を示す圧密試験からの透水係数と、水平に堆積した自然地盤の透水性の違いを表していると考えられよう。均質に堆積しているように推定される自然の粘土層であっても、草根の穴、腐植物、クラックの存在はあり、これらが地層の均質を損なわせることは容易に想像できる。ここで用いた1m足らずのサンプリング試料でも、上記の均

質性を欠く原因を含み、粘土層内では水みちが存在する可能性がある。この結果、水頭差150cmのときの透水係数と比較すると、平均水平方向透水係数は1.15×10⁻⁴cm/secである。圧密試験からの数値は、切り出し方の違いを含めて5×10⁻⁷cm/secとなり、これらには三桁の開きがあり複雑な自然地盤の排水特性が伺われる。以上は、自然堆積した粘土地盤の透水性に関する議論である。この検証を踏まえて、次項では段階的に圧力が加わる条件（間隙比を変化させたときの）における粘土の透水性と、一次元圧密理論からの透水係数について、実験結果によって確かめることにする。

3.2 圧密応力下における透水係数

粘土は小さな載荷によっても体積の変化が生じ、透水係数も間隙の大小により大きく影響される。一

般に $e \sim \log k$ の関係は直線的な関係にあると考えられている。

特定の理論を通して抽出された透水係数である圧密試験からの透水係数に代えて、実際に即した透水係数を用いて解析を行う動きがあるが、これを機会に圧密試験から算定される透水係数の位置づけも必要であると思われる。以下では、ここで提案する現実の沈下現象に即した排水条件下の圧密試験を行いながら透水試験を行える試験機を用いて、圧縮応力を変化させたときの粘土の透水係数について評価をし、合わせて圧密試験から得られる透水係数について究明する。

図-2、図-4の試験機を用いて実際に測定された透水係数を間隙比に対して示したのが図-12である。これらの結果は、間隙比が同じときでも通水方向が異なる。粒子構造の違い、つまり圧密に伴って水平方向へ配向度が増加し、構造的に異方状態を大きく示す試料に対する水平・鉛直方向の透水係数の変化を表す。図-13に示した $e \sim \log p$ 曲線から確認できるように、実験に用いた粘土は $0.9 \sim 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ 程度の先行圧密圧力を示す。透水係数が著しく低下したところはこの先行圧密圧力付近であり、圧密領

図-12 間隙比と透水係数の関係
(圧密後の透水試験による)

Fig. 12 Coefficient of permeability versus void ratio
(from consolidation-permeability tests)

域の違いにより変化が大きいことが分かる。しかし、応力が増加し間隙比が小さくなくても、水平方向の透水性は鉛直方向ほどは低下せず、堆積面に平行な配向構造に移行していることが推測できる。したがって、図-14に示すように、水平方向の経路に比べて鉛直方向の透水経路は長くなり、その影響がこの差異を生じさせていると考えるのが妥当であろう。

図-15には、試料寸法の異なる圧密試験結果から求められた(鉛直方向)透水係数を示す。土質試験法(1982)では、次式によって粘土の透水係数を評価できると示されているが、

$$k = r \cdot (m_{v24}) \cdot c_{v24} \cdot \gamma_w \quad (2)$$

一次圧密比 r を導入すると、一般に $r < 1$ であるた

図-13 $e \sim \log p$ 曲線 (100% 圧密時)

Fig. 13 $e \sim \log p$ curve (primary consolidation)

図-14 異方透水性

Fig. 14 Anisotropic permeability

図-15 間隙比と（鉛直方向）透水係数の関係
（圧密試験による）

Fig. 15 Coefficient of vertical permeability versus void ratio (from laboratory oedometer test)

め過小評価するとして、弾性圧密理論から導かれる関係式か標準圧密試験結果を用いた次の式を適用することが勧められている（村上、1987）。

$$k = m_{v24} \cdot c_{v24} \cdot \gamma_w \quad (3)$$

ここに、 m_{v24} は24時間載荷の標準圧密試験から求まる体積圧縮係数、 c_{v24} は同様な条件における圧密係数である。この補正の有無ならびに採用する圧密進行過程の時期に対する議論もなされ（三笠、1989）圧密試験から得られる透水係数の物理的な位置づけが問われている。その意味でも、本報告で提案するような圧密透水試験によって実地盤に適合するような異方透水性の評価法が、今後の沈下解析を進展させる上で必要になるとと思われる。

図-15の実線で結んだ白抜き記号は式(3)によって求めたものであり、破線は現行の土質試験法（1982）に示された式(2)から求まる透水係数を表している。この場合、過圧密状態から正規圧密状態に圧密過程が移行しても図-12の透水試験による結果ほど大きな変化はない。また、一般に認識されている直線的な低下とは異なり、下に凸な曲線を示して減少している。

図-12、図-15の結果と図-10のS-試験の値も併せて判断すると、過圧密状態における圧密試験から得られた透水係数の結果は実測した透水係数の値より過小に表れる傾向にあると思われる。特に、標準圧密試験に用いられる小さな試料では、実測した排水性との差が大きいことが明らかである。しかし、直径15cm以上の試料では、圧密理論を通して抽出されたもの、透水試験による結果も正規圧密領域ではほとんど変わらないことが興味深い。ただ、これらの結果が前述した不均質な物質を含んだ全層厚に対する排水特性をどれだけよく現しているかには疑問が残る。

4 まとめ

最近の沈下問題を解析する手法では、圧密係数に代わって透水係数を積極的に用いようとする動向がある。これまでのように沈下解析と地盤の透水性の把握は別々の領域であるという取り扱われ方から、この関係を結び付けて設計法の体系を見直すことは重要であると、著者らも考える。

本報では、このような状況を踏まえて、これまであまり問題とされることが少なかった粘土の水平方向透水係数について考察してみた。従来、粘土の透水係数はかなり低いものとは認識されていたが、均質に堆積したと思われる自然地盤であっても実際の透水性は、かなり草根の穴、クラック等の影響をうけて大きくなることが測定結果から明らかになった。また、試料の圧密沈下現象に即した排水条件下における圧密透水試験と圧密試験から得られる透水係数の比較検証では、過圧密領域において差が大きく、透水試験を行って求めたものに比較して、式(3)による結果は過小に評価することが確かめられた。また、試料の大きさによる影響も現われ、不均質な粘土の圧密特性を知るためには、現状の標準圧密試験より大きな試料を用いて行う必要があることを示唆しているとも思われた。

特に、異方透水性に関しては、配向構造による差異も表れ、粘土試料の排水に水平方向の透水性がもたらす促進効果は、圧密進行速度に対して決定的な影響を与えることが考えられる。その点、本試験機によれば、図-1(b)、(c)に示した実際の土の配向構造と異なる条件で、異方圧密ならびに排水させた試験結果では現すことができない、原位置の堆積環

境およびそれに載荷されたときの状態に近い排水性が得られる可能性を秘めている。それだけに、厳密な値を必要とするときには、ここで提案するような圧密透水試験を行って解析値を得る必要があると考える。

なお、粘土の透水試験法は改訂案（土質工学会、1982）でも適用外とされ、他の試験に比べて改良が進められているとは思われない。今後、更に改良・開発がなされ精度の高い測定値が得られることが望まれる。

謝 辞

本報をまとめるに当たり、日本大学 山村和也教授、岡山大学 西垣 誠助教授には、適切にご教示、ご助言を賜わった。ここに厚く御礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

- 赤木俊允・石田哲朗（1988）：粘性土地盤に対する水平方向透水試験法，土木学会論文集，394/Ⅲ-9，123-130.
- 網干寿夫・松田 博（1981）：粘土の二次圧密と沈下解析，土と基礎，29-3，19-24.
- 荒井克彦・渡辺知幸・田行啓一（1983）：多次元圧密数値手法の比較，土質工学会論文報告集（研究ノート），23-3，189-195.
- 大西有三・村上 毅（1980）：有限要素法による地盤の応力・変形を考慮した浸透流解析，土木学会論文報告集，298，87-96.
- 風間秀彦・石井三郎・黒崎秀（1981）：圧密過程における粘土の構造変化，土と基礎，29-3，11-18.
- 田村 武（1978）：Biotの圧密方程式に関する一考察，土木学会論文報告集，274，57-67.
- 土質工学会編（1982）：土質試験法（第2回改訂版），334-422.
- 三笠正人（1989）：『粘土の透水係数の評価法に関する考察（村上幸利著）』，に対するディスカッション，土質工学会論文報告集，29-2，202-206.
- 村上幸利（1987）：粘土の透水係数の評価法に関する考察，土質工学会論文報告集（研究ノート），27-3，167-170.
- Rowe,P.W. (1959) : Measurement of the Coefficient of Consolidation of Lacustrine Clay, Geotechnique, 9, 107-118.
- Rowe,P.W.and Barden,L. (1966) : A New Consolidation Cell, Geotechnique, 16, 162-170.
- Terzaghi,K. (1943) : Theoretical Soil Mechanics, John Wiley & Sons, 243-244.

（受付：1989年6月30日、受理：1989年9月22日）