

室内透水試験法の変遷と今後の課題

Improving Permeability Test in the Laboratory and the Future Direction

西垣 誠 (にしがき まこと)

岡山大学大学院教授 環境学研究科

1. はじめに

透水試験は、土中の水の浸透しやすさを表す透水係数を実験室内で求める試験である。フランス人の H. Darcy が「土の中を浸透する流速 (v) は対象としている供試体両端の全水頭 (h) の差 (Δh) をその供試体の長さで割った値 (i) である動水勾配に比例する。」という法則 (Darcy の法則) を 1856 年に提唱した。その比例係数が透水係数 (k) である。すなわち、 $v=ki$ の k を求める試験が透水試験である。この透水試験の方法に関して、地盤工学会 (旧土質工学会も含む) の「土質試験」の中でどのように変化してきたかについて、本文では述べることにする。

2. 透水試験法の変遷

(1) 初代 透水試験 (1961年)

土質試験法の中で昭和35年の「土質試験法解説」¹⁾では、なぜか透水試験方法がない。圧密試験方法もなかった。

1961年に JIS A 1218 として「土の透水試験」は基準された。そして、昭和39年 (1964年) の土質試験法には「実験室における透水試験」と「現場における透水試験」についての方法が説明されている²⁾。この時にはじめて、H. Darcy の実験が説明され、その内容を以下で紹介する。定水位透水試験と変水位透水試験についての解説がされている。

(a) 適用範囲

この時点で適用範囲は層流状態の範囲である。すなわち、動水勾配と流量が直線関係になっている範囲と限定している。

(b) 供試体の状態による透水係数の変化

当然のことであるが、同じ土であっても、その間隙比が変われば、透水係数の値は変化する。

(c) 浸透する水の温度依存性

土の間隙を通過する水の粘性が温度によって変化するので、水温 15°C の時の透水係数を基準とし、その補正の図と表を示している。

(d) 透水係数の異方性

攪乱した土と不攪乱の土では、同じ間隙率でも透水係数の値が異なり、水平に締め固められた供試体には透水係数に異方性があり、水平方向の透水係数は鉛直方向の透水係数の数十倍になることがある事を指摘している。

(e) 供試体の飽和度の影響

透水係数の値が飽和度によって変化することも示している。飽和度が低いと透水係数の値が小さくなることは言われているが、「しかしながら飽和度が土の透水係数に及ぼす影響は、粒度、間隙比、構造などによる影響より少ない。」との文章が記されている。この頃には、透水係数はオーダーで議論されており、同じ供試体の飽和度が変化することにより、透水係数の値の変化については、それほど大きな問題とならなかったようである。

(f) 試験方法の選択

透水試験に関しては、「透水性のやや高い土に適用できる試験」と「透水性のやや低い土に適用できる試験」に別けて、「定水位透水試験」と「変水位透水試験」が説明され、供試体の内径が 10 cm と規定され、試験する試料の最大粒径の 20 倍以上とも規定されている。この試験用のモールド (透水円筒) の内径に関してはなぜ 20 倍というかについては論述されていない。

(g) フィルターについて

供試体の下端 (流出端) に設置するフィルター (有孔板) に関してはそれほど厳密な規定はしていない。供試体からの細粒土が流亡しないように、0.40 mm のフルイを通過するような細粒土を含んでいる供試体に対しては 0.25 mm 以下のフルイ目の金網を用いる事を指摘している。

(h) 試験水と試験中のその蒸発

時間がかかる試験ではメスシリンダーからの蒸発を防ぐために、シリンダーの水面に油を一滴くらい落とすよう注意書きがある。また、このような供試体に対しての試験に用いる水は脱気水を用いるよう指導している。

(i) 変水位透水試験に対する注意

供試体の真空度を 600 mmHg 以上に保って約 10 分間放置し十分に脱気して、供試体を飽和にして変水位透水試験を実施するように規定でなっている。また、脱気水としては 1 度沸騰した試験水を用いるよう規定されている。

ここで特筆することは、スタンドパイプ内の水位の降下速度が一定であるかないかによって、供試体の飽和度を検定する方法が示されている。すなわち、 h_1 と h_2 の中間に $\sqrt{h_1 h_2}$ なる高さをスタンドパイプに印をつけ、 h_1 を通過する時間を t_1 、 $\sqrt{h_1 h_2}$ の高さを通過する時間を t_m 、同様に h_2 を通過する時間を t_2 とすると、 $t_m - t_1$ の値が $t_2 - t_m$ の値と等しいかどうかで供試体の飽和度や細かい

論 文

粒子の流亡を検定し、もし、等しくなければ試験をやり直すよう注意している。

特殊な材料に対する試験として粒径が4.8 mm以下の礫材料に対しての変水位透水試験法と、粒径が4.8 mm以上の材料に対しての特殊な試験法が解説されている。また、非常に透水度の低い土(シルトやシルト質粘土等)に対しての試験法として圧密試験器を用いての変水位試験や圧密試験結果からの間接的な透水係数の求め方も許されている。

上記のように最初の試験法の規定や解説の段階で現在の透水試験法のほぼ全体の骨格は完成されていたと言っ

(2) 第1回改訂版(1969年)³⁾

最初の試験法から10年後の1969年の第1回改訂版では実験室内での透水試験についてのみの記述になっている。これは、土質試験法とともに土質調査法が初刊され、原位置透水試験に関しては土質調査法で取り扱うようになったためである。

試験法の中の透水試験のまえがきの中で、室内透水試験より原位置透水試験の方が信頼度が高い事を強調しているところが興味深い。

第1回の改訂版で特筆すべき事項は、変水位透水試験のフィルターの規定をしているところである。

$$D_{15F}/D_{15S}=12\sim40, \quad D_{50F}/D_{50S}=12\sim50 \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 D_{15F} 、 D_{50F} はフィルター材料の15%および50%粒径であり、 D_{15S} 、 D_{50S} は試料の15%および50%粒径である。

これらの式で、最初の式は、フィルターの透水係数が試料の透水係数より十分に大きな値であるべきだとの規定である。また第2番目の式は、試料の細粒分がフィルターを通して流亡しないようにするための規定であるが、 D_{50} で本当にいいののかの疑問がある。

試験水は脱気することになっている。この中で「常温で空気含有量を回復する速度はかなり遅い。」との記述がある。また、ダルシーの法則の適用限界として、透水係数が小さい粘土試料には限界動水勾配が存在することを指摘している。

(3) 第2回改訂版(1979年)⁴⁾

第1回改訂版から10年後の1979年に第2回改訂版が出版された。この版では、変水位透水試験での供試体の飽和度を高める方法として、前回の改訂版のように真空度が600 mmHgで10分程度放置した後給水するだけでなく、この操作を繰り返し行って、管路の中の空気が完全に排除するまで行うよう規定している。

また、繰返し試験を行うと、通水による細粒分の移動等で次第に透水係数の値が変化することがある事を指摘して、試験による透水係数の値が安定した状態での透水係数を求めるように指導している。

定水位透水試験で、透水円筒にピエゾメータを設置するよう規定したところも、この改訂版の特徴がある。この規定はフィルターの影響が排除できるためきわめて利にかなった規定であるが、既存の装置を改良する必要が

あるため、その後の規定ではピエゾメータの設置は規定からはずれている。透水円筒の内径が試料の最大粒径の20倍以上から10倍以上になったのも、この改訂版からである。この値はASTMを参考にしている。また、フィルターの透水係数が、求められる透水係数にどの程度影響するかを定量的に示したのも、この改訂版が最初である。煮沸後の水の溶解酸素量の変化を実際にグラフで示し、空気含有量の回復速度がかなり遅いことを示している。

透水度の低い土に対し、三軸圧縮試験装置や圧密試験装置等を用いての変水位透水試験についてはより詳細に示されたが、圧密試験による間接的に透水係数を求める方法は解説からなくなっている。また、変水位透水試験でのスタンドパイプ内の水位の降下速度からの供試体の飽和度の検定方法も解説書のスペースの関係から割愛されている。

(4) 土質試験の方法と解説(1990年)⁵⁾

新しく、土質工学会から地盤工学会に組織名が変わり、「土質試験法」から「土質試験の方法と解説」と書名が変わった。それまでは、「透水試験」として独立した章であったが、「透水試験・圧密試験」として一つの編の中で検討された。

この試験法では、透水円筒の内径があまりきびしくなくなった。また、最も大きな変化は、定水位および変水位透水試験でも、供試体を内蔵した透水円筒を水没させて供試体の飽和度を高めるために減圧脱気する方法を採用した。後者は、大きな改善である。なぜなら、従来は定水位透水試験では供試体を飽和にする必要がなかったが、今後は定水位透水試験でも供試体を積極的に飽和にしようという改訂である。また、定水位、変水位の両透水試験の前の飽和度を高める日本独特の手法が、規準となった。これは、従来の飽和の方法に問題があり、その改良方法として提案された方法である。ただ、水浸脱気法では、供試体内の真空度を徐々に高めていかないと、脱気による浸透によって供試体を乱してしまう可能性がある事に注意が必要である。

供試体の飽和度の測定に対しても、従来は試験後の含水比の測定が義務づけられていたが、保水性の小さい試料では含水比の測定の際に土中水が流出してしまう事が多いので、材料に対して試験者が判断するようにしている。

十分脱気した供試体の飽和度を簡単な装置で測定する方法も解説の中で示している。これも新しい方法であり海外ではない手法である。

基準以外の室内透水試験方法として、解説の中に二つの特筆すべき試験方法が紹介されている。一つは透水係数の大きい礫を対象として、層流から乱流までの透水係数を求める方法である。試験法は定水位試験で別に特別な試験ではないが、試験円筒が大型になる。このように層流から乱流までの礫の透水係数の値は揚水ダムのフィルター層の中の透水性の評価に用いられている。

もう一つの試験方法は、自然での堆積土や締め固めた土

の鉛直と水平方向の異方性の透水係数を求める方法である。この試験は現在でもそれほど一般的にはなっていないが、透水係数の値をより厳密に求め、その異方性の値を数値解析による浸透流解析に入力して、ダムの上揚圧力や掘削底部の過剰間隙水圧の評価に利用されようとしている。

(5) 第1回改訂版(2000年)⁶⁾

2000年に「土質試験の方法と解説」の第1回改訂版が出版された。この試験の解説書の中に新たに不飽和土を対象とした室内透水試験法が紹介された。これは、今までの試験は飽和状態の土を対象としていたが、飽和領域と不飽和領域を対象とした3次元での浸透流の数値解析が一般的となり、その解析に必要となる不飽和土の透水係数をどのように求めるかを示したものである。一般的なRichardの定水位透水試験と非定常法である瞬時水分計測法について解説の中で説明されている。

3. これから期待される透水に関する試験法

透水試験の基準の歴史を振り返るとこの試験は1961年にJIS A 1218に制定され、その後1997年に一部改正された。1979年と1990年にも改正され、1993年からSI単位に統一された。SI単位に関しては地盤の他の分野に対して、透水係数に関してはそれほど混乱もなく統一された。1998年にも軽微な改正がされ、2000年よりJGS 0311-2000として新しい基準となっている。

実験室内での透水試験として今後どのような試験方法を開発していくべきかをここで模索してみる。

(1) 不飽和土を対象とした試験法の確立

降雨浸透による斜面崩壊や洪水時の河川堤防の決壊等の地盤災害が最近の豪雨によって日本中の多くの地区で発生している。このような現象を予測するには、原位置での不飽和状態の地盤を対象とした試験が有効である。しかし、飽和度を変化させながら原位置でのこのような透水試験を遂行することはきわめて特殊な試験で、現実としてあまりやられていない。このような現状に対して原位置の各層よりサンプリングした供試体を対象とした室内での不飽和土の透水試験法としてRichardの定常法や非定常法である瞬時水分計測法を先に述べた。しかし、斜面崩壊や堤体に関するシルト質の土に対してこのような試験をすることは現状でもきわめて困難である。

また、サンプリングした供試体にどのようにテンションメータを設置するのに関してもまだまだ多くの問題を含んでいる。たとえ計測できても、テンションメータのポラスカップと供試体との接触によって土中水が逆流するような結果を得ることもある。

瞬時水分計測法も、サンプリングした供試体の排水試験や浸潤試験を行うには、現場より長い不攪乱の供試体を準備する必要が生じる。供試体内の水分量の変化の計測には誘電率を計測するコンパクトな計測器も開発され

ているが、供試体の直径が $\phi 70\sim 100$ mm ぐらい必要となる。このように、現行のこの種の手法に関しては今後の改良が必要であり、それが確立されないと不飽和土の災害は定量的な評価ができないと言っても過言でない。

(2) 超低透水性材料の透水係数

廃棄物の最終処分場の止水材としてベントナイトが用いられている。当然不飽和状態で粘土ライナーが施工されるが、その透水係数を短時間でどのように求めるかが大きな課題である。

ベントナイトは放射性廃棄物の地層処分においても、人工バリアーとしてきわめて有効な材料となっている。この材料が現場で地下水を吸水しながらどのように膨潤し、透水係数がどのように変化するのが大きな問題となっている。この場合には、高レベル放射性廃棄物が出す熱が伝熱している中で、ベントナイトブロックが不飽和状態から飽和に変化する過程での透水係数の変化を求めなければならない。周囲から地下水がベントナイトブロックに浸潤していく中での空隙内での空気がどのような挙動をし、透水に対してどのような影響があるかについても検討する必要が生じている。すなわち、土の中の透気係数の飽和度に依存した値を計測する方法を確立しなければならない。これらは、世界中の研究者が取り組んでいる課題である。

(3) 土壌・地下水汚染に係る浸透特性の計測方法

土壌・地下水汚染に係る浸透特性として地盤内を移動する汚染物質の透過係数の計測方法の確立が大きな課題である。すなわち、地盤内の有機塩素性化合物や油類の透過係数をサンプリングした供試体に対してどのように計測するかである。すなわち、不飽和領域内でのガス移動に関する物性である透過係数を求めることが今後の課題である。

このように、種々の材料に関して室内での透水試験法に関しては、まだまだ開発しなければならないテーマがある。若い研究者が実験室内で黙々と実験している状況が少なくなってきた今日、もう一度、実験室内で浸透に関する真髓を探究してくれることを祈る。

参考文献

- 1) 土質工学会編：土質試験法解説（第1集），改訂版，1960。
- 2) 土質工学会編：土質試験法，pp. 191～229，1964。
- 3) 土質工学会編：土質試験法（第1回改訂版），pp. 250～273，1969。
- 4) 土質工学会編：土質試験法（第2回改訂版），pp. 334～371，1979。
- 5) 地盤工学会編：土質試験の方法と解説，pp. 271～288，1990。
- 6) 地盤工学会編：土質試験の方法と解説，第1回改訂版，pp. 334～347，2000。

(原稿受理 2005.8.1)