非定常法による不飽和土の透気係数の 室内での計測法に関する研究

西垣 誠¹・瀬尾 昭治²

¹フェロー会員 岡山大学大学院教授 環境生命科学研究科 (〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中3-1-1)

E-mail: n_makoto@cc.okayama-u.ac.jp

²正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

E-mail: seno@kajima.com

本研究では、不飽和土における浸透問題を気相と液相の二相流の観点から定量的に評価するために、気相の透気機構を支配する透気係数を飽和度の高い範囲において計測できる室内透気試験法を提案した。この方法は、非定常法の室内不飽和透水試験法である瞬時水分計測法を応用したもので、原理的に不飽和土の透水係数と透気係数を同時に計測できる。また、提案した試験法で間隙空気圧の変動を精度良く計測するため、不飽和土の気相と液相の圧力を分離して間隙空気圧を計測するためのフィルター材についての検討を行い、従来、間隙空気圧の計測に用いられてきたガラスフィルターに代わるフィルターを提案した。

Key Words : two phase flow, air permeability test, intrinsic permeability, instantaneous profile methods

1. はじめに

地盤は、構造骨格を形成する土粒子とその間隙とから構成されている。飽和領域の間隙は水で満たされているが、不飽和領域では間隙に水と空気が存在している。通常、地下水と呼ばれる間隙水を、我々が直接観察することは不可能である。しかしながら、地盤中の間隙水の挙動を定量的に把握することは、地盤工学、地下水工学、治水・防災、土壌・地下水汚染対策等、土木工学に係わる分野のみならず、農業土木、資源工学等の分野においても、極めて重要な問題である。

ここで、不飽和土に着目すると、その間隙は一般に水と空気の二相から成り立っているにもかかわらず、不飽和土中の水の浸透に関する研究の多くは、間隙中に存在する空気は水に比べるとはるかに速やかに移動するものと仮定し、空気の影響を無視して水のみの一相問題として取り扱ってきた^{1,2)}。しかし、厳密には間隙空気存在により地下水の浸透が制限されるような場合には、空気による影響はもはや無視し得ないものとなり、空気の移動と圧縮性を考慮した気相と液相の二相流(気液二相流)の問題として考える必要がある。このような気液二相流浸透問題としては、降雨浸透による堤防や斜面の安定性^{3,4)}、圧気シールド工法^{5,6)}、土壌・地下水汚染の評価と対策^{7,8)}、石油・LPG等の水封式岩盤貯蔵に関する

気密性能^{9,10)}、放射性廃棄物地層処分における緩衝材の浸潤問題^{11,12)}、二酸化炭素の回収・地下貯留(CCS: Carbon Dioxide Capture and Storage)^{13,14)}、圧縮空気地下貯蔵(CAES: Compressed Air Energy Storage)^{15,16)}等が挙げられる。

1970年代以降のコンピューター性能の急速な向上に伴い、現在では地盤内の水と空気の挙動を同時に考慮できる気液二相流解析手法が、極めて有効な数値解析手法として多く行われるようになってきている¹⁷⁻²¹⁾。この際、二相浸透流解析の入力パラメータとして、不飽和透水係数や水分特性曲線といった不飽和浸透特性とともに飽和度(体積含水率)と透気係数との関係や飽和土中への空気侵入値(Air Entry Value)等の透気特性が必要となり、解析精度の向上にはこれらの透気特性を正しく評価することが重要となる。

これらの物性値の中で、透気係数に関しては、室内試験による測定方法がいくつか提案されているが²²⁾、いずれも含水率の高い状態では、重力の作用や空気の移動により間隙水の移動が生じ、含水状態が不均一になる等の問題点がある。したがって、飽和度と不飽和透水係数の関係に対応するような飽和度に依存した透気特性を室内試験で求める手法については未だ確立されていないのが現状である。ここで、地盤材料の室内試験における透気係数の測定例は、そのほとんどが空気圧力勾配にもとづ

く試験装置によるものである。これらの試験方法は、加圧型試験法と吸引型試験法に分類されている²⁹⁾。加圧型試験法は、Evans and Kirkham²³⁾、長田²⁴⁾、坂口ら²⁵⁾、神谷ら²⁶⁾によって、また、吸引型試験法については、Tanner and Wengel²⁷⁾、宇野ら²⁸⁾によって考案されてきた。このような研究例があるにもかかわらず、国内では透気係数の室内測定方法は未だ基準化されていないが、国際標準化・規格設定機関である ASTM International によって、土質試料および岩石試料に対する試験方法がそれぞれ規格化されている^{29),30)}。

しかしながら、これらに代表される従来の透気試験の方法は、すべて定常試験法であり、以下のような問題点が存在すると考えられる。

- (1) 供試体を作成する際、供試体内の含水状態を均一にすることがきわめて困難であり、また含水率の高い状態では、重力の作用による間隙水の移動が生じ供試体内の含水状態が均一でなくなる。
- (2) 試験中に空気が供試体を通過する際、空気の移動によって間隙水の移動が生じ、供試体の含水状態を均一に保つことが困難である。

このように透気係数測定法は、透水係数測定法に比較してさまざまな問題点が存在する。また、これらの問題点は、供試体が高含水状態になるにつれて一層顕著になる。

上記問題点を鑑みると、飽和に近い高含水状態までの透気係数を精度良く測定できる透気試験法を開発することが重要であることがわかる。特に、多湿な我が国の地盤の多くは、飽和に近い状況にあり、高含水状態での不飽和土の透気係数を求めることは、原位置で計測した間隙水圧のデータ等から解析モデルの妥当性を論議する際等においてきわめて重要である。

本研究は、不飽和地盤内の水と空気の流動を支配する透気係数の定義を明確に示し、飽和に近い状態での飽和土中の透気係数の非常法による測定方法を確立することを目的とするものである。

2. 透気係数の考え方

多孔質媒体中の流体の流れを定量的に議論するためには、流体ならびに多孔質媒体に関する物性値が必要となる。流体に関しては、密度、粘性、圧縮率が、媒体に関しては、間隙率（または間隙比）、固有透過度、圧縮率がこれで、これらから水理定数を導入することができる。ここで、水の透水係数に対応する空気の透気係数を整理するにあたって、水が非圧縮性流体であると仮定できるのに対して、空気が圧縮性流体であるために、流体に関する物性については、それぞれその取り扱いが異なる。

いま、多孔質媒体中における流体の性質とは無関係なその媒体固有の透過性を表す固有透過度 K と、ダルシーの透水係数 k_w および透気係数 k_a の関係は、Taylor によってそれぞれ次式のように表される³¹⁾。

$$k_w = K \frac{\rho_w g}{\mu_w} \quad (1)$$

$$k_a = K \frac{\rho_a g}{\mu_a} \quad (2)$$

ここに、 k_w : 透水係数 [LT^{-1}],
 k_a : 透気係数 [LT^{-1}],
 K : 固有透過度 [L^2],
 ρ_w : 水の密度 [ML^{-3}],
 ρ_a : 空気の密度 [ML^{-3}],
 g : 重力加速度 [LT^{-2}],
 μ_w : 水の粘性係数 [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$],
 μ_a : 空気の粘性係数 [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$].

式(1) および式(2) では、透水係数および透気係数等のある媒体中における流体毎の通りやすさを示すパラメータ（以下、透過係数とする）は各々の流体の性質と土質材料の性状により決定され、土質材料の性状が同一であれば、透過係数は流体の単位体積重量に比例し、粘性係数に反比例することが示されている。この式は一般的に温度により流体の粘性が変化する場合、あるいは2種類以上の流体を取り扱う場合に用いられる。

上述の通り同一媒体中では、式(1) と式(2) の固有透過度 K は理論的に等しいはずである。しかし、空気の場合には、ダルシーの法則の前提のように流体が構造骨格（土粒子）の表面に付着することなく、すべり現象（slip flow）が発生する。このすべり現象によって、土粒子表面沿いの気体の流速が大きくなるため、気体の固有透過度 K_g が液体の固有透過度 K_l より大きくなる現象が、1941年に Klinkenberg により発見され³²⁾、これは Klinkenberg 効果とよばれている。Klinkenberg 効果の関係式は、次式で表される³³⁾。

$$K_g = K_l \left(1 + \frac{4cl}{r} \right) = K_l \left(1 + \frac{b}{p_m} \right) \quad (3)$$

$$b = \frac{c\kappa}{\sqrt{2}\pi r^3}, \quad l = \frac{\kappa}{4\pi\sqrt{2}r^2} \frac{T}{p_m} \quad (4)$$

ここに、 K_g : 気体の固有透過度 [L^2],
 K_l : 液体の固有透過度 [L^2],
 c : 定数 [-],
 l : 平均自由行程 [L],
 r : 間隙半径 [L],
 κ : ボルツマン定数 [$\text{ML}^2\text{T}^{-2}\theta^{-1}$],
 T : 絶対温度 [θ],
 b : Klinkenberg 定数 [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$],
 p_m : 平均間隙流体圧 [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$].

式(3), 式(4) から間隙半径が小さく, 気体の温度が高く, 気体の圧力が小さい場合に K_l と K_g の差が大きくなる. また, 不飽和土の場合には, 高含水比になると間隙半径が小さくなること等から, 同様に K_l と K_g の差が大きくなると考えられる. 以上のことから, 水の固有透過度 (以下, 固有透水係数とする) K_w と空気の固有透過度 (以下, 固有透気係数とする) K_a は対象とする土に対してそれぞれ計測すべきであると考え, 式(1), 式(2) を次式のように表わす.

$$k_w = K_w \frac{\rho_w g}{\mu_w} \quad (5)$$

$$k_a = K_a \frac{\rho_a g}{\mu_a} \quad (6)$$

水の場合は物性 (ρ_w, μ_w) の圧力依存性が小さいので, 取り扱い上便利なダルシーの透水係数 k_w を専ら用いている. 気体の場合を考えると, 以前我が国の圧気シールド工法を対象とした原位置透気試験では透水係数と同様な考え方で透気係数 k_a を求めている時期もあるが^{5), 6), 34)}, 空気の密度 ρ_a は圧力依存性 (圧縮・膨張性) が大きく, 空気の粘性係数 μ_a とともに温度に依存するため, 同一境界条件・媒体中でさえも透気係数 k_a の値は大きく変わることになる. そのため, 透気に関しては流体の性質および圧力レベルに影響を受けない固有透気係数 K_a を支配パラメータとすることが妥当であるといえる.

3. 間隙空気圧計測用フィルター材の検討

透気試験において間隙空気圧を精度良く計測することは, 極めて重要な問題である. しかし, 不飽和土の間隙中には水と空気が同時に存在しているため, 間隙水圧および間隙空気圧を別々に計測するには, 水と空気の圧力を分離して精度良く計測する必要がある. したがって, 精度良く間隙空気圧を計測するためには, 水圧と空気圧を分離して計測することができる特徴を有したフィルター材等の適用性の検証は不可欠であると考えられる. 従来, 間隙水圧の計測にはセラミックディスク^{35), 36)}やセラミックカップ^{37), 38)}が, 間隙空気圧の計測にはフィルターを用いないで直に細管で計測する方法^{39), 40), 41)}やガラスフィルター等が用いられてきた^{35), 36), 37)}.

しかし, 従来の間隙空気圧計測方法の精度や耐久性についての検討があまりなされていないので, ここではフィルター材の適用性について検討した.

(1) 間隙空気圧計測用フィルター材の検討

間隙空気圧を計測する際の課題を以下に示す.

- 1) 空気の圧縮性 (計測時間遅れ) .
- 2) フィルター材の撥水性 (限界耐水圧) .

表-1 間隙空気圧測定用フィルター材の一覧

フィルター名	ガラス フィルター	PTFE メンブレン フィルター
素 材	ガラス粒子	ポリテトラフルオロ エチレン(PTFE)
孔 径	—	3 μ m
粒子径	5~10 μ m	—
空隙率	55 %	83 %
コネクタ構造 Type の表示記号	G	M

図-1 間隙空気圧測定用コネクタ構造

3) フィルター材の耐久性 (限界使用時間) .

ここでは, 種々のフィルター材の中で表-1 に示す 2 種類のフィルター材 (ガラスフィルター, PTFE メンブレンフィルター) について適用性を検討した. また, ガラスフィルターについては, 宇野⁴²⁾の測定方法を参考に防水スプレー (有機溶剤: 約99%, フッ素樹脂: 0.3%) を塗布したものも検討した. 実験に用いた 3 種類のコネクタ (Type G, Type G(S), Type GM) の構造を図-1 に示す. ここで, コネクタとは, 試験用カラムと圧力変換器とを接続する真鍮製部品である. なお, コネクタとフィルターの接着にはエポキシ樹脂系接着剤を用いており, 接着面からの漏気, 漏水がないことは, 実験前にその気密性試験により確認した.

a) フィルター材の計測時間遅れ

図-2 に示すような密閉容器に, フィルター材を装着したコネクタ(A)とフィルター材を装着しないコネクタ(B)を接続し, それぞれのコネクタを通して計測される空気圧の時間差の検証を行った. 一例としてコネクタ(A)に Type G(S)を装着した場合の結果を図-3, 図-4 に示すが, フィルター通過時の空気の圧縮性による空気圧の計測時間遅れはほとんどないことが判明した. なお, 他のフィルター材についても同様の結果が得られており, 圧力変換器内のダイヤフラムの変形を生じさせるほどの微量な空気がフィルター材を通過することによる間隙空気圧の計測の際の時間遅れはないことがわかった.

図-2 フィルター材計測時間遅れ試験装置

図-3 空気圧測定結果例 (Type G(S), 正圧)

図-4 空気圧測定結果例 (Type G(S), 負圧)

b) フィルター材の限界耐水圧

フィルター材の撥水性がどの程度の水圧に耐えるかを検証するために図-5 に示す実験を行った。すなわち、実験では、空気圧を計測できるようにフィルターを装着したコネクタ上の水位を 30秒毎に 2cm ずつ段階的に上昇させ、その反応を計測した。それぞれのフィルター材についての結果を図-6 に示す。この結果より、図-1 の Type G については、計測した空気圧は水圧とほぼ同値を示している。これは計測した値が空気圧ではなく水頭の値に依存していることを示している。したがって、ガラスフィルターだけでは、間隙空気圧と間隙水圧とを分離して計測することが困難であることがわかる。実際に実験終了後コネクタ内に水が侵入していた。また、

図-5 フィルター材限界耐水圧実験装置

図-6 フィルター材の限界耐水圧実験結果

図-7 フィルター材 (Type GM) の限界耐水圧実験結果

Type G(S)については、水頭が 60cm 以下においては計測する空気圧に水圧の影響はほとんどなく、水頭が 60cm を越えると計測する空気圧が上昇し始め最終的には水圧の値とほぼ同値を示した。したがって、この Type G(S)の水圧に対する限界耐水頭値は約 60cm であることがわかった。これより、限界耐水頭値以下の低い間隙水圧下では、ガラスフィルター（粒子径 5~12 μm ）に防水スプレーを塗布したフィルターを用いて、間隙空気圧を間隙水圧と分離して計測することが可能であることになる。さらに、Type GM については、水頭が 80cm になっても計測した空気圧に水圧の影響はみられなかった。そのため、追加実験を実施し限界耐水圧を確認した結果、図-7 に示すとおり Type GM の水圧に対する限界耐水頭値は

図-8 フィルター材の使用時間に関する実験結果例 (Type G(S))

表-2 間隙空気圧測定用フィルター材の適用性

Type	加工性	計測時間遅れ	耐水圧	耐時間	耐久性	総合評価
G	◎	◎	×	×	◎	×
G(S)	○	◎	○	○	○	◎
GM	△	◎	◎	◎	△	○

凡例：◎優，○良，△可，×不適

20m 程度であることがわかった。このことより、PTFE メンブレンフィルターは、限界耐水圧においてより有効であるといえる。なお、図-6 の 0~240 秒で、Type G(S) と Type GM の測定値に微小な圧力変化が生じている原因については、フィルター材が水没した際にその表面に作用するサクシジョンの影響ではないかと推定しているが、その挙動の詳細については今後の課題であると考えている。

c) 使用時間に関する検討

水中において長時間フィルターを使用すると、フィルター材の撥水性がなくなり、計測した空気圧に水圧の影響がでてくることが予想された。そこで、フィルター材の撥水効果の継続時間を確認するために、使用時間についての検証を行った。なお、使用時間に関する検討対象とするフィルターは、限界耐水圧実験の結果を踏まえて、Type G(S)と Type GM の 2種類とした。また、瞬時水分計測法での試験時間を考慮し、検証実験の計測時間は 1 時間を上限とした。

本検討には図-5 に示した実験装置を用い、水頭を 60cm に固定して実験を行った。その結果の一例を図-8 に示す。なお、Type GM についても図示した Type G(S) と同様の結果を得た。この結果より、1 時間程度ではフィルター材の撥水効果に問題はないことがわかった。

図-9 土柱内の一次元鉛直浸透の概念図

(2) 間隙空気圧計測用フィルター材の選定

間隙空気圧測定用フィルター材の適用性実験の結果を整理してその適用性を表-2 に示す。これより、間隙空気圧計測用フィルター材には、ガラスフィルターの表面に防水スプレーを塗布したもの (Type G(S)) と PTFE メンブレンフィルター (Type GM) の 2種類が適していることがわかった。ただし、加圧型の透気試験等、高い水圧がかかる場合には、限界耐水圧が高い PTFE メンブレンフィルター (Type GM) の方が適している。しかし、PTFE メンブレンフィルターは薄膜であるため、その取り扱いにおいて、コネクタの設置時に供試体との摩擦や、設置時の傷付け等により、漏気・漏水の原因となるため、十分な注意が必要である。したがって、本研究においては、加工しやすく耐久性があり、取り扱いやすい、ガラスフィルターの表面に防水スプレーを塗布した Type G(S)を用いた。

4. 不飽和土の透気係数の非定常測定方法

(1) 瞬時水分計測法による透気係数の求め方

a) 瞬時水分計測法

本研究では、Watson, K. K. が提唱した瞬時水分計測法⁴³⁾を用いて、非定常法により固有透気係数を求めた。ここで、瞬時水分計測法とは、図-9 に示すように鉛直一次元の土柱内で湿潤過程あるいは排水過程の実験開始後、時々刻々と変化する体積含水率の分布と間隙水圧の変化を計測することにより、不飽和透水係数および水分特性曲線を求める方法である⁴⁴⁾。この計測法はきわめて

短時間の計測で不飽和土の浸透特性を求めることが可能である。また、ポーラスストーンや供試体の不均質性の影響がないため、より正確な土の浸透特性を求めることができる。本研究では、この方法を透気係数を求める方法に拡張した。

b) 透気係数の求め方

瞬時水分計測法による固有透気係数 K_a の求め方を示す。図-9 に示す土柱内の空気の一次元鉛直浸透の運動の式⁴⁵⁾および連続の式⁴⁶⁾は、それぞれ次に示す式(7)、式(8)で表せる。

$$\begin{aligned} v_a &= -\frac{K_a(\theta_{sat} - \theta_w)}{\mu_a} \frac{\partial P_a}{\partial z} \\ &= -\frac{K_a(\theta_a)}{\mu_a} \frac{\partial P_a}{\partial z} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho_a \theta_a)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho_a v_a)}{\partial z} \quad (8)$$

ここに、 v_a : 空気の浸透流速 [LT^{-1}],

K_a : 固有透気係数 [L^2],

θ_w : 体積含水率 [-],

θ_{sat} : 飽和体積含水率 [-]

(θ_{sat} は間隙率 n に等しい) ,

θ_a : 体積含気率 ($=\theta_{sat} - \theta_w$)⁴⁷⁾ [-],

μ_a : 空気の粘性係数 [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$],

P_a : 空気圧 [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$],

z : 基準面からの高さ [L],

ρ_a : 空気の密度 [ML^{-3}],

t : 時間 [T].

運動の式(7)を連続の式(8)に代入すると次式になる。

$$\frac{\partial(\rho_a \theta_a)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho_a K_a(\theta_a)}{\mu_a} \frac{\partial P_a}{\partial z} \right) \quad (9)$$

次に、式(7)の両辺を z で積分すると次式となる。

$$\int \frac{\partial(\rho_a \theta_a)}{\partial t} dz = \frac{\rho_a K_a(\theta_a)}{\mu_a} \frac{\partial P_a}{\partial z} + C_1 \quad (10)$$

式(10)において、 C_1 は積分定数である。

ここで、鉛直一次元排水実験を対象とし図-9 に示す記号を用いる。地表面を基準面 $z_1 = 0$ にとると、底面 z_6 では空気の補給がないため $v_a = 0$ となる。この境界条件を式(10)に用いると、式(10)は次式となる。なお、空気の密度 ρ_a はそのときの空気圧 P_a に対応した値をとる。

$$\int_{z_1}^{z_6} \frac{\partial(\rho_a \theta_a)}{\partial t} dz = \frac{\rho_a K_a(\theta_a)}{\mu_a} \frac{\partial P_a}{\partial z} \quad (11)$$

したがって、任意時間 t における任意の点 z での固有透気係数は次式より求められる。

図-10 排水実験における各深度での体積含水率の経時変化の概念図

図-11 排水実験における体積含水率の経時変化の概念図

$$K_a(\theta_a) = \frac{\left(\int_{z_1}^{z_6} \frac{\partial(\rho_a \theta_a)}{\partial t} dz \right)}{\frac{\rho_a}{\mu_a} \left(\frac{\partial P_a}{\partial z} \right)_{z,t}} \quad (12)$$

ここで、式(12)の右辺の分子、分母は以下の手法で求められる。

c) 式(12)の分子の求め方

- (1) 図-9 に示す土柱の各計測点において、体積含水率の経時的変化を計測する (図-10 参照)。
- (2) 各時間に対する体積含水率と z 座標の関係を図-10 より、図-11 に示すように整理する。
- (3) 図-11 より、任意の点 (たとえば点 z_3) における時間 t_1 から t_2 の空気の浸透流量は、図-11 中の斜線部の面積 A を用いて次のように近似することができる。ただし、空気は理想気体とみなす。

図-12 排水実験における各深度での間隙空気圧の経時変化の概念図

$$A = A_{z_3, t_2} - \frac{P_{z_3, t_1}}{P_{z_3, t_2}} A_{z_3, t_1} \quad (13)$$

ここに、 A_{z_3, t_1} : 任意の点 (z_3) より下方の時間 $t=0$ から $t=t_1$ までの面積、

A_{z_3, t_2} : 任意の点 (z_3) より下方の時間 $t=0$ から $t=t_2$ までの面積、

P_{z_3, t_1} : 時間 $t=0$ から $t=t_1$ の任意の点 (z_3) における間隙空気圧の平均値、

P_{z_3, t_2} : 時間 $t=0$ から $t=t_2$ の任意の点 (z_3) における間隙空気圧の平均値。

式(13) で計算した A を用いることにより、式(12) の分子は任意の時間 $(t_1+t_2)/2$ における任意の点 z_3 の値として、次式のように計算される。

$$\left(\int_{z_3}^{z_4} \frac{\partial(\rho_a \theta_a)}{\partial t} dz \right)_{z_3, \frac{t_1+t_2}{2}} \div \frac{\rho_a A}{t_2 - t_1} \quad (14)$$

d) 式(12)の分母の求め方

(1) 図-9 および図-11 中の z_2 , z_3 , z_4 における間隙空気圧の経時変化を排水実験において同時に計測する (図-12 参照)。

(2) 任意時間 $(t_1+t_2)/2$ における任意の点 z_3 での間隙空気圧の勾配は、上下の点 z_2 と点 z_4 の間隙空気圧 (P_2, P_4) を用いて近似的に $(P_2 - P_4)/(z_2 - z_4)$ と求められることから、式(12) の分母は次式のように計算される。なお、空気密度 ρ_a は空気圧 $(P_2 + P_4)/2$ に対応した値をとる。

$$\left(\frac{\rho_a}{\mu_a} \cdot \frac{\partial P_a}{\partial z} \right)_{z_3, \frac{t_1+t_2}{2}} \div \left(\frac{\rho_a}{\mu_a} \cdot \frac{P_2 - P_4}{z_2 - z_4} \right)_{\frac{t_1+t_2}{2}} \quad (15)$$

式(14), 式(15) の値を式(12) に代入することにより固有透気係数の値が求められる。

なお、固有透気係数と体積含水率の関係は、透気係数を計算した時間および計測点に対応する体積含水率の値を図-10 より求めることによって得られる。以上の方法によると、体積含水率の経時変化の計測は土柱の計測点の下方について行う必要がある。一方、間隙空気圧の

経時変化は不飽和土の透気係数を求めようとする点の上下における空気圧勾配を求めるため、最低 2ヶ所での計測が必要である。しかし、試験カラム内の複数点での間隙空気圧を計測すると、不均質な供試体についても透気係数が求められる。

(2) 中性子による土中水分変化の計測法

a) 中性子水分計の原理

瞬時水分計測法において、体積含水率の経時変化の計測については中性子水分計を用いて行った。中性子線による水分量の計測は、土中での中性子の弾性散乱による減速効果と拡散現象を利用するもので、土を構成する元素のなかで、主として水分子を形成している水素原子がきわだって大きい減速能を持っているという事実由来している。この原理から明らかなように、中性子線による水分量の計測は、土中に生成される熱中性子束の密度が一定の測定条件のもとでは土中の水分量に直接支配され、その水分量そのものを検出することができるため、土中の水分量測定に適している。また、中性子線による水分量の計測は、計測範囲が全含水量の領域におよび計測時間も非常に短いという特徴を有している。加えて、非破壊測定法であることから、供試体や地盤を乱すことなく随時繰り返し測定が可能であり、原位置での水分検層や盛土の水分量計測等に、有効な水分計測法として利用されてきた⁴⁸⁾。さらに、 γ 線に比較して中性子の方がよりシャープな勾配の校正曲線を得られ、水分量の計測の精度が良くなる特徴を有している。このように、中性子水分計は、 γ 線密度計を用いた水分計測法⁴⁹⁾に比較して有利な特徴を多く有しているものの、計測点の座標が定めにくい問題があったため、室内浸透実験での水分計測には用いられてこなかった。そこで、本研究では、土中で熱中性子に還元されずに透過してくる速中性子をスリット状の減速材（ここでは、高含水素物質であるアクリル樹脂を採用）を通過させることによって水分測定領域を局所化する方法でこの課題を克服し、中性子水分計を適用した^{50), 51)}。

また、現在では体積含水率の計測で誘電率が多く用いられているが^{52), 53)}、この方法では飽和に近い水分量の計測において誤差が生じることがあるため、本研究では中性子線を用いた。なお、中性子水分計の中性子線源には、カリホルニウム252 (^{252}Cf , 半減期: 2.65年), 1.11 MBq を用いた。

b) 中性子水分計の校正曲線の算定

中性子水分計を用いて供試体の体積含水率の経時変化を求める場合、体積含水率 θ_w と中性子カウント比 R_n ($=N/N_0$) との関係を事前に求めておかなければならない。ここで、 N は供試体を設置した状態でのカウント数、 N_0 は何も設置しない状態でのカウント数である。

図-13 体積含水率計測点の高さと構造タイプ分類

本研究で提案する透気係数測定においては、供試体を作成する際、長さ 80cm の鉛直一次元排水実験用アクリル製カラムを 3個使用したため、Type 1, Type 2, Type 3 の3種類の校正曲線を求めることとした。Type 1, Type 2, Type 3の計測点の分類を図-13 に示す。また、分類の理由を以下に示す。

- (1) 190cm, 180cm, 170cm の計測点は、圧力変換器取り付け用のコネクタが両側に設置されており、中性子の透過率が他の計測点に比較して低くなるため、Type 1として校正係数を求めた。
- (2) 160cm, 80cm の計測点は、カラムの連結部でカラムの上部および底部にフランジが施されており、中性子の透過率が他の計測点に比較して低くなるため、Type 2として校正係数を求めた。
- (3) 上記(1)および(2)以外の一般部を Type 3として校正係数を求めた。

本実験では、体積含水率を飽和から絶乾までの5段階に対してのカウント比を求めた。それらの結果を図-14 に示し、これらの関係を直線と仮定して、それぞれの校正曲線を次式に示すように求めた。

$$R_{n(\text{Type1})} = 0.559 - 0.349\theta \quad (16)$$

$$R_{n(\text{Type2})} = 0.536 - 0.368\theta \quad (17)$$

$$R_{n(\text{Type3})} = 0.572 - 0.341\theta \quad (18)$$

図-14 土の体積含水率と中性子カウント比との関係

図-15 瞬時水分計測法を用いた透気試験装置の概要図

(3) 透気係数測定実験

a) 透気係数測定の実験装置

実験装置は次に示す3つの部分から構成される。

(1) 透気試験用カラム

透気試験用カラムは、図-15 に示すように、鉛直一次元排水実験用アクリル製カラム（長さ 80cm, 断面 8×5 cm）を 3個使用した。排水口は供試体の下端と等しい高さで、大気圧に開放した。

(2) 体積含水率計測システム

体積含水率の経時的変化の計測は中性子水分計を用いて行い、その全体図を図-16 に示す。また、体積含水率の計測点については図-17 に示す。

(3) 間隙空気圧計測システム

間隙空気圧計測に関しては、圧力変換器の先端に Type G(S) のコネクタ（防水スプレーを塗布したガラスフィルターを取り付けたもの）を用いて図-13 および図-17 に示す6点で計測した。

図-16 中性子水分計測装置の概要図

図-17 間隙空気圧および体積含水率の計測点位置図

b) 試料

実験に用いた試料には、ここで新しく提案した非定常法の妥当性を確認するため、比較的浸透に関するデータが豊富な豊浦標準砂（土粒子の密度 2.64 g/cm^3 ）を用いた。粒径加積曲線を図-18 に示す。供試体は脱気処理を

図-18 試料（豊浦標準砂）の粒径加積曲線

したイオン交換水に試料を水中落下させて、乾燥密度 ρ_d が 1.54 g/cm^3 （間隙率 $n: 0.42$ ）となるように締め固めて作成した。

c) 実験手順

実験の手順について以下に説明する。

- (1) 実験前、体積含水率と中性子カウント比の関係を計測し、校正曲線を補正した。
- (2) 水中落下により試料を所定の乾燥密度になるように締め固めた後に、供試体底部より排水した。
- (3) 間隙空気圧計測用の圧力変換器を装着した。
- (4) 供試体の底部より水を通水させ、試料を飽和した。
- (5) 供試体の飽和状態を確認するため、中性子のカウント数を計測した。
- (6) 供試体上端面に水位を設定して、初期条件とした。
- (7) 供試体の底部の排水コックを開いて実験を開始し、供試体の各計測点での計測時間における間隙空気圧と体積含水率の経時の変化を計測した。
- (8) (3)～(7) の作業を各計測点で 3 回ずつ、全計測点について計測した。

d) 排水実験結果

間隙空気圧の経時の変化を、図-17 に示す透気カラムの No.1 (190cm)～No.3 (170cm) と No.5 (150cm)～No.7 (130cm) の計6点で計測し、体積含水率の経時の変化を No.1 (190cm)～No.15 (50cm) の計15点で計測した。これより得られた結果を以下に示す。

(1) 体積含水率

体積含水率の経時の変化を図-19 に示す。また、参考としてそれぞれの高さにおける計測値について回帰分析を行い求めた近似曲線を図中に併記した。また、近似式を式(19)に示す。なお、式中の係数 a 、 b 、 c および相関係数 R を表-3 にまとめて示す。

$$\theta = a - b \cdot c' \quad (19)$$

さらに、各時間に対する高さ z と体積含水率 θ_w の関係を図-20 に示すように整理した。

ここで注意しなければならないことは、実験手順で記述したように、供試体を飽和させる際、供試体の底部よ

図-19 計測高さにおける体積含水率の経時変化

表-3 式(19)の各係数と相関係数R

計測高さ z	a	b	c	R
190cm	0.133	-0.287	0.996	0.988
180cm	0.147	-0.261	0.998	0.990
170cm	0.169	-0.440	0.997	0.993
160cm	0.183	-0.786	0.997	0.992
150cm	0.203	-0.826	0.998	0.981
140cm	0.240	-4.369	0.996	0.994
130cm	0.241	-41.244	0.995	0.964
120cm	0.227	-185.010	0.995	0.998
110cm	0.098	-5.624	0.998	0.998

図-20 体積含水率の経時変化

り水を通水するため、供試体を完全な飽和状態にすることは不可能であるということである。したがって、各計測開始前における供試体の飽和状態の再現性を確認した結果、間隙率 n は試料作成時の 0.42 の状態で、体積含水率 θ_w は平均的に約 0.36 であることがわかった。

(2) 間隙空気圧

前述の間隙空気圧測定用フィルター Type G(S) を用いて

図-21 各深度での間隙空気圧の経時変化

図-22 体積含水率と透気係数との関係

計測した間隙空気圧の経時的変化を図-21 に示す。ここでは、No.1 (190cm)～No.3 (170cm) の 3点における間隙空気圧の経時的変化を、空気の圧力勾配を求めるために用いることとした。また、式(13) で通過する空気の流量を求める際の圧力補正には、No.5 (150cm)～No.7 (130cm) の 3点における間隙空気圧の計測値を用いた。

(3) 固有透気係数

式(12) の固有透気係数の求め方で、No.1 (190cm) と No.2 (180cm) との midpoint である $z=185\text{cm}$ の点および No.2 (180cm) と No.3 (170cm) との midpoint である $z=175\text{cm}$ の点における固有透気係数を求めた。固有透気係数を算定した経過時間は 200～1200 秒であり、時間間隔は中性子水分計で取得した 100 秒毎の実測データを用いた。その結果を図-22 に示す。図中には、回帰分析により求めた近似曲線を併記した。また、近似式 (相関係数 $R: 0.899$) を式(20)に示す。

$$K_a = 2.089 \times 10^{-8} - 5.889 \times 10^{-8} \times \theta \quad (20)$$

なお、固有透気係数の算定は、計測ステップを細かくすることで数多く算出することができる。これに関して、間隙空気圧の計測ステップを細かくすることは比較的容易であるが、中性子水分計を用いた計測と線源の移動に計測点 1 点当たり 100 秒程度の測定間隔が必要である、そのため、これ以上の時間ステップによる透気係数の算

図-23 体積含水率と透気係数との関係 (定常法追記)

出は、式(19)で示したような近似式を用いて体積含水率の値を推定することで可能になる。

e) 考察

本研究では、瞬時水分計測法を用いることによって、高含水状態における透気係数を求める手法を提案した。しかし、この手法では低含水状態における透気係数が取得できないため、同じ供試体を用いて Tanner and Wengel が提唱した定常法による室内透気試験法²⁷⁾で、低含水状態の固有透気係数を併せて求めた。この結果を非常法により求めた結果と併せて図-23に示す。図中には、回帰分析により求めた近似曲線を併記した。非常法に用いた近似式は式(20)と同様であり、また、定常法に用いた近似式 (相関係数 $R: 0.962$) を式(21)に示す。

$$K_a = 2.775 \times 10^{-7} - 1.127 \times 10^{-6} \times \theta \quad (21)$$

定常法における一連の実験では、体積含水率が 0~0.2 の範囲において透気係数を計測することが可能であったが、0.2 以上の高含水状態では計測が困難であった。一方、非常法では体積含水率が 0.15~0.35 の比較的高含水状態の範囲での透気係数を求めることが可能であった。さらに、定常法と非常法の結果を比較すると、図-23 のとおり、体積含水率が 0.15~0.22 の範囲において固有透気係数に最大で1オーダーに近い相違が認められる。この原因として、定常法の高含水率では前述したとおり間隙水の移動等による不均一性により高めの値を示していることが推定される。一方、本研究で提案した非常法においては、低含水比側では排水に伴う空気移動速度が緩やかになり大気圧の開放面が徐々に近づくこと等に起因すると考えられる測定精度の低下の可能性も否定できない。しかしながら、このように定常法と非常法の透気係数測定法を併用することで、乾燥から飽和状態までの固有透気係数を求めることができたことは一定の成果であると考えている。

5. 結論

本研究では、水と空気の間流で、実際の土中の物質移動をより厳密に評価するという観点から、不飽和土における空気の透気機構を支配する透気係数を非常法で計測する手法の提案を行った。すなわち、透気係数測定実験については、間隙空気圧計測に関する検証実験を行い、従来の定常法による実験法に加えて、瞬時水分計測法を用いることによって、非常法により高含水状態における透気係数を求める実験法の提案を行った。

本研究より得た結論および今後の課題を以下に記す。

(1) 間隙空気圧の計測方法

不飽和土中の間隙空気圧の計測方法として、間隙空気圧を間隙水圧と分離するためのフィルター材についての適用性について検討し、従来使用されていたガラスフィルターだけでは不十分であることを実験によって示した。この改善策として、ガラスフィルターの前面に PTFE メンブレンフィルター (孔径 3.0μm) を設置する方法と、ガラスフィルターの前面に撥水性の防水スプレーを塗付する方法の有用性を実験で検討した。その結果、防水スプレーを塗付したフィルターは間隙水の水頭が 60cm まで耐えられることがわかった。一方、PTFE メンブレンフィルターを設置したフィルターは、20m 程度の水頭まで耐えられることがわかった。また、間隙空気圧計測点での水圧が 60cm 以下となる試験であれば、防水スプレーを塗付したフィルターでも計測できることから、本論文で提案した非常法による透気係数測定実験に実際に使用した。その結果、固有透気係数を算出するために必要な間隙空気圧を精度良く測定することができた。

(2) 非常法による透気係数測定実験

高含水状態における透気係数を精度良く求めるために、非常法による透気係数測定実験を提案した。まず、瞬時水分計測法による透気係数の求め方を確立し、次に、一次元の鉛直の土柱を用いた瞬時水分計測法により、透気係数測定実験を行った。その結果、ここで提案する非常法を用いると、高含水領域の土の透気係数が計測できることがわかった。これより、従来の Tanner and Wengel²⁷⁾の定常法による透気試験と、今回提案した瞬時水分計測法による透気試験を併用することによって、全含水領域に関する透気係数の測定が可能となることが示唆された。しかしながら、定常法と非常法の固有透気係数の算出値が体積含水率 0.15~0.22 の範囲において最大で 1オーダーに近い相違が認められた点については残された課題であると考えている。

さらに、本論文で提案した透気係数を対象とした瞬時水分計測法において、間隙水圧の計測を並行して計測す

ること、原理的に透水係数も同時に求めることが可能であることは、本試験方法の優れた利点であるといえる。

(3) 検討課題

本論文で提案した試験法については、今後、堤体や斜面を構成する地盤材料等、様々な材料への適用性を検討していく必要とともに、これらの透気特性データを蓄積していく必要があると考えている。また、本研究では気相が連続して移動すると仮定しているが、気泡として移動する気相に関しての研究は今後の課題である。

謝辞：本研究を行うにあたり、越智克夫氏（元 岡山大学大学院、現 清水建設(株)勤務）にご協力をいただきましたことをここに記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) Neuman, S. P. : Saturated Unsaturated Seepage by Finite Elements, *Proc., ASCE HY*, Vol. 99, No. 12, pp. 2233-2250, 1973.
- 2) 赤井浩一, 大西有三, 西垣 誠 : 有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析, 土木学会論文報告集, No.264, pp.87-96, 1977.
- 3) 山村和也, 久楽勝行 : 堤防への浸透と堤体の安定性, 土木研究所報告, No.145, pp.41-71, 1972.
- 4) 加藤亮輔, 岡二三生, 木元小百合, 小高猛司, 角南進 : 不飽和浸透-変形連成解析手法と河川堤防への適用, 土木学会論文集 C, Vol.65, No.1, pp.226-240, 2009.
- 5) 増田義孝, 三木幸蔵 : 営団地下鉄永田町工事現場における現地透気試験について, 土と基礎, Vol.18, No.1, pp.3-10, 1970.
- 6) 木島詩郎, 藤村 正 : 圧気シールド工事に伴う現場透気試験について, 土と基礎, Vol.23, No.4, pp.19-27, 1975.
- 7) Semer, R., Adams, J. A. and Reddy, K. R. : An experimental investigation of air flow patterns in saturated soils during air sparging, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 59-75, 1998.
- 8) 西垣 誠, 菅野雄一 : 地盤への油の浸透に関する基礎的研究, 土木学会論文集 C, Vol.63, No.1, pp.249-268, 2007.
- 9) 佐藤邦明 : 燃料岩盤地下備蓄の現状とその水封・気密機能, 土木学会誌, Vol.70, No.9, pp.48-54, 1985.
- 10) 江原昌彦, 佐藤専夫, 鳥羽瀬孝臣 : 液化石油ガス地下備蓄基地の概要, 電力土木, No.307, pp.105-109, 2003.
- 11) 竹内真司, 原 啓二 : 高レベル放射性廃棄物の地層処分における緩衝材中の水分の気・液二相移動, 動燃技報, No.89, pp.57-62, 1994.
- 12) 田中幸久, 廣永道彦, 工藤康二 : 飽和した高密度ベントナイトのガス移行メカニズムとそのモデル化, 土木学会論文集 C, Vol.65, No.1, pp.303-320, 2009.
- 13) Bielinski, A., Ebigo, A., Kopp, A., Class, H. and Helmig, R. : Numerical Modeling of CO₂ sequestration with MUFTE-UG, *XVI International Conference on Computational Methods in Water Resources (CMWR-XVI)*, 2006.
- 14) 駒田広也 : 二酸化炭素地中貯留, 地盤工学会誌, Vol.56, No.7, pp.65-66, 2008.
- 15) Meiri, D. : Two-phase flow simulation of air storage in an aquifer, *Water Resources Research*, Vol. 17, No. 5, pp. 1360-1366, 1981.
- 16) 中川加明一郎, 志田原巧, 池川洋二郎, 末永 弘, 伊藤由紀, 田中伸和 : 水封式岩盤内圧縮空気貯蔵ガスタービン発電(CAES)にかかわる土木技術課題の検討評価, 電力中央研究所研究報告書, No.U45, 2004.
- 17) 河野伊一郎, 西垣 誠, 浅間康史 : 有限要素法による水と空気の二相浸透流解析, 土質工学研究発表会発表講演集, Vol.19, pp.1371-1374, 1984.
- 18) 中川加明一郎, 駒田広也, 宮下国一郎, 村田 満 : 岩盤内圧縮空気貯蔵空洞からの漏気防止条件, 土木学会論文集, No.370/III-5, pp.233-241, 1986.
- 19) 齋藤雅彦, 川谷 健 : 間隙内空気の運動を考慮した数値シミュレーションによる雨水浸透・浸出過程に関する研究, 応用力学論文集, Vol.6, pp.865-872, 2003.
- 20) Yamamoto, H. and Pruess, K. : Numerical simulation of leakage from underground LPG storage caverns, *LBNL Report*, LBNL-56175, 2004.
- 21) 小林健一郎, Reinhard HINKELMANN, Rainer HELMIG, 寶 馨, 玉井信行 : 2相モデルおよび2相・3成分モデルによる地下帯水層メタン輸送数値実験, 土木学会論文集 B, Vol. 63, No. 2, pp.120-133, 2007.
- 22) 地盤工学会編 : 不飽和地盤の挙動と評価, pp.66-67, 2004.
- 23) Evans, D. D. and Kirkham, D. : Measurement of the air permeability of soil in situ, *Soil Sci. Soc. Ame. Proc.*, No. 14, pp. 65-73, 1949.
- 24) 長田 昇 : 土壌の通気性に関する実験的研究(I)—土壌の通気性について—, 農業土木研究別冊, No.7, pp.37-42, 1963.
- 25) 坂口雄彦, 伊藤 洋, 佐藤邦明, 清水昭男 : 岩石および開口割れ目における透気に関する基礎研究, 土木学会論文集, No.445/III-18, pp.17-25, 1992.
- 26) 神谷浩二, Rully BAKRIE, 本城勇介 : 保水性を制御した不飽和土の透気係数の測定, 土木学会論文集 C, Vol.62, No.3, 2006.
- 27) Tanner, C. B. and Wengel, R. W. : An air permeameter for field and laboratory use, *Soil Sci. Soc. Ame. Proc.*, No. 21, pp. 663-664, 1957.
- 28) 宇野尚雄, 杉井俊夫, 神谷浩二 : 比表面積測定に基づく土粒子物性と透気性・透水性の考察, 土木学会論文集, No.469/III-23, pp.25-34, 1993.
- 29) ASTM International : ASTM D6539-00(2006)e2 Standard Test Method for Measurement of Pneumatic Permeability of Partially Saturated Porous Materials by Flowing Air, 2006.
- 30) ASTM International : ASTM D4525-08 Standard Test Method for Permeability of Rocks by Flowing Air, 2008.
- 31) Taylor, D. W. : *Fundamentals of Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, pp. 113-114, 1948.
- 32) Klinkenberg, L. J. : The permeability of Porous media to liquids and gases, American Petroleum Institute, Drilling and Productions Practices, pp. 200-213, 1941.
- 33) 谷川 亘, 嶋本利彦 : 第三紀堆積岩を用いたガスと水の浸透係数の比較と Klinkenberg 効果, 応用地質, Vol.47, No.3, pp.131-139, 2006.

- 34) 三木幸蔵, 北川義治, 森 邦夫: 砂質地盤における透気性状の解析について, 第17回土質工学研究発表会講演集, pp.2393-2396, 1982.
- 35) 軽部大蔵, 苗村康造, 森田 登, 岩崎哲雄: 不飽和土の力学的性質に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.269, pp.105-119, 1978.
- 36) 西垣 誠, 河野伊一郎, 竹下祐二, 楠見和紀: 不飽和土の三軸試験装置および計測システム, 地盤と建設, Vol.6, No.1, pp.59-69, 1988.
- 37) Watson, K. K. : Some operating characteristics of a rapid response tensiometer system, *Water Resources Research*, Vol. 1, No. 4, pp. 577-586, 1965.
- 38) 河野伊一郎, 西垣 誠, 竹下祐二, 堀謙一郎, 清水孝昭: pF 試験における間隙水圧挙動に関する考察, 第26回土質工学研究発表会講演集, pp.1683-1684, 1991.
- 39) 石原英雄, 高木不折, 馬場洋二: 雨水の鉛直浸透に関する実験的研究, 京都大学防災研究所年報, No.9, pp.551-563, 1966.
- 40) Vachaud, G., Vauclin, M. and Khanji, D. : Effect of Air Pressure on Water Flow in an Unsaturated Stratified Vertical Column of Sand, *Water Resources Research*, Vol. 9, pp. 160-173, 1973.
- 41) 朴 鍾瑄, 丸井敦尚: 降雨流出過程における間隙空気の影響に関するカラム浸透実験, 日本水文科学会誌, Vol.32, No.1, pp.3-12, 2002.
- 42) 宇野尚雄, 筧 正人, 太田丈晴: 不飽和砂質土の三軸試験における状態量の計測, 土質工学会 不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム発表論文集, pp.17-22, 1987.
- 43) Watson, K. K. : An instantaneous profile method for determining the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials, *Water Resources Research*, Vol. 2, No. 4, pp. 709-715, 1966.
- 44) 河野伊一郎, 西垣 誠: 不飽和砂質土の浸透特性に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第307号, pp.59-69, 1981.
- 45) Muskat, M. : *The Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media*, New York: McGraw-Hill, pp. 56-74, 1937.
- 46) Collins, R. E. (監訳: 富士岡義一): 浸透理論—多孔性物体中の流体の運動—, 畑地農業振興会, pp.59-66, 1974.
- 47) 山本莊毅: 地下水調査法, 古今書院, pp.6-37, 1983.
- 48) 三嶋 信雄: RI による現場密度・含水比の測定, 土木施工, Vol.28, No.10, pp.210-221, 1987.
- 49) 河野伊一郎, 西垣 誠, 頼木清隆: ガンマ線による土中水分変化の測定, 第14回土質工学研究発表会, pp.1137-1140, 1979.
- 50) 河野伊一郎, 西垣 誠, 延山政之: 中性子水分計の室内透水試験への適用に関する研究, 第18回土質工学会研究発表会発表論文集, pp.1317-1320, 1988.
- 51) 西垣 誠, 森田 修, 延山政之: 2重線源法による土中の不飽和浸透特性の計測, 土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集, pp.207-208, 1987.
- 52) 西垣 誠, 小松 満, 熊本 創, 二宮 功: 誘電率計測法を用いた地盤塩水汚染度のモニタリング手法, 土と基礎, Vol.47, No.10, pp.17-20, 1999.
- 53) 西垣 誠, 小松 満, 金 萬鎰: FDR 法による土壌・地下水汚染のモニタリング手法に関する基礎的研究, 地下水学会誌, Vol.46, No.2, pp.145-157, 2004.

(2013.6.12 受付)

A STUDY ON AIR PERMEABILITY TEST IN LABORATORY BY AN UNSTEADY STATE METHOD

Makoto NISHIGAKI and Shoji SENO

This study proposes a new laboratory testing method for unsaturated zone air permeability, which is the dominant factor for air flow in unsaturated zones, under the condition of higher degree of saturation. The method applies the instantaneous profile method, which is an unsteady state method for measuring an unsaturated hydraulic conductivity in laboratory. To measure accurately fluctuations of unsaturated pore air pressure with extremely high water content, pore water pressure should be separated. Two new types of filters, PTFE filter and water repellent coating filter, are evaluated as an alternative to traditional glass filters, which cannot separate these pressures. As a result, the gas phase pressure detected with these new filters is sharply separated from the liquid phase pressure in unsaturated soil. Theoretically, this new testing method with the instantaneous profile method can measure both water permeability and air permeability for evaluating two-phase flow simultaneously.