

カラム試験器を用いた粘土の拡散係数の測定

小澤一喜¹・竹村次朗²・日下部治³

¹正会員 博士(工) 鹿島建設(株)技術研究所 環境技術研究部(〒182-0036 調布市飛田給 2-19-1)

²正会員 博士(工) 東京工業大学助教授 工学部土木工学科(〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1)

³正会員 Ph.D. 東京工業大学教授 工学部土木工学科(〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1)

埋立廃棄物処分場では遮水工として、粘土ライナーが広く用いられており、粘土ライナーの性能評価についての透水性に関する研究は数多く報告されている。しかし、粘土中の汚染物質の拡散に関して、粘土の状態量と分子拡散係数との関係を明確にしたものは数少ない。本研究では独自に開発したカラム試験器を用いて模擬汚染物質によるトレーサー透水試験を行い、粘土の間隙比と分子拡散係数の関係について調べた。また、カラム試験器を用いた分子拡散係数の測定法の開発という観点から、カラム試験から得られた試験結果に含まれる誤差を数値解析を用いたシミュレーションにより定量的に評価し、測定された分子拡散係数の精度についても併せて検討した。

Key Words: hydraulic conductivity, hydrodynamic dispersion, molecular diffusion, clay, column test

1. はじめに

(1) 背景

管理型埋立廃棄物処分場で用いられる粘土ライナーの遮水特性についてこれまでに多くの研究が報告されている。特に、粘土もしくは粘土・砂混合土の透水係数に着目したものととしては、砂に対する粘土の混合率や含水比、混合土の粘土部の間隙比などの粘土の状態量をパラメーターとした研究結果が数多く報告されている^{1)~9)}。また、電解質水溶液を用いてトレーサー透水試験を行ったものでは、イオンの吸着と透水係数に関する研究結果も報告されている^{10), 11)}。山間部に建設される埋立廃棄物処分場では、処分場内に溜まった雨水が、遮水ライナー部より数十センチメートルほど高い水位となる事も考えられる。そのような状況では比較的大きい動水勾配が作用するという事を考慮すると、低い透水性を保つ事は、遮水ライナーの設計の際に非常に重要な要素である事が分かる。

近年、用地確保の困難さと水源の水質汚染の問題により新規の廃棄物処分場の建設が非常に難しくなっており、その様な観点から海洋(海岸)埋立廃棄物処分場の利点が注目されている¹²⁾。山間部埋立処分場と比較して海洋埋立処分場では周辺水位が高く、

処分場内部から外部に向けて大きな動水勾配が作用する可能性は低いと考えられる。したがって海洋埋立処分場からの汚染物質の漏出を考慮する際には、汚染物質を含む水が粘土ライナーを透水する事による漏出よりも汚染物質の分子拡散による漏出が重要であると考えられる。また、山間部の埋立廃棄物処分場においても、通常は、処分場内の水位は低く保たれている事を考えると分子拡散による汚染物質の漏出が重要となる。さらに、モニタリングによるライナー内の漏出挙動の測定値の解釈には分子拡散特性の把握が必要不可欠といえる。このように粘土ライナーの性能評価をする際には、透水係数だけでなく分子拡散係数も考慮する必要がある事が分かる。さらに、近年では、粘土ライナーの透水係数と流体力学的分散係数の両者に着目した研究も行われるようになっており、嘉門・勝見¹³⁾はジオメンブレンと粘土ライナーによって構成される遮水ライナーからの汚染物質の漏出量を算出する方法を提案している。ここで、分子拡散係数は、濃度勾配による汚染物質の広がり程度を表し、機械的分散係数は多孔質体中を流体が透過する際の流速の微視的な不均一な分布による乱れから生じる汚染物質の広がり程度を表す。また、流体力学的分散係数とは分子拡散係数と機械的分散係数の和を示しており、3. (2) で詳述する様に流

速の小さい場合では、流体力学的分散は、分子拡散に依存し、流速の大きい場合では機械的分散に依存する。

これまでに土に代表される多孔質体の分子拡散係数を求めるために数多くの室内試験、現場計測試験が行われ、その結果が報告されている。福井・桂山¹⁴⁾は豊浦砂を用いてトレーサー透水試験と拡散試験を行い、流速が $1 \times 10^{-6} \text{m/s}$ 以下になると分子拡散係数と流体力学的分散係数は同等の値として取り扱える事を実験的に示している。ここから粘土中の透水のように非常に流速が小さい場合、機械的分散はほぼ無視する事ができ、流体力学的分散は、主に、分子拡散に依存すると考える事ができる。この事は Rowe¹⁵⁾ や Ozawa¹⁶⁾ によっても確認されている。

Rowe¹⁵⁾ は剛壁カラム試験器を用いた拡散試験から、Sarina clay(間隙率 $n=0.38$)中の Na^+ , K^+ , Cl^- などの分子拡散係数を求めた。一方、Barone¹⁷⁾ は NaCl , MgCl_2 , CaCl_2 , KCl などの多種類の塩を溶かした水溶液を用いて、Grey clay($n=0.39$)に対して拡散試験を行い、分子拡散係数を求めた。その結果を単一種の塩の水溶液を用いた拡散試験の結果と比較し Na^+ , K^+ については、分子拡散係数が 20%減少し、 Cl^- については 25%増加すると報告している。Gillham¹⁸⁾ は H^+ , Cl^- などを用いて、混合率を変えたベントナイト混合土 ($0.35 < r < 0.65$) に拡散試験を行い、 Cl^- がベントナイト混合土に拡散する際のトーチヨシティ τ (流路曲折度)は $0.59 < \tau < 0.84$ となる事を報告している。また、寺島¹⁹⁾ はモルタルなどの難透水性の材料に対して拡散試験を行い NH_4^+ , Cl^- の分子拡散係数を求めている。Yanful and Quigley²⁰⁾ や Crooks and Quigley²¹⁾ は、使用中の廃棄物処分場の粘土ライナーのサンプルデータから Na^+ , Cl^- 、その他の分子拡散係数を求めた研究を報告しているなど、これまでにイオン種に着目し、多孔質体中の分子拡散係数を求める研究が数多く行われている。

(2) 本研究の目的と論文の構成

前述の様にイオン種に着目し、多孔質体中の分子拡散係数を求める研究は多数報告されているが、粘土の状態量に着目し、粘土中の分子拡散係数を求める研究の報告例は少ない。粘土は応力履歴に対して間隙比、透水係数などが大きく変わるため、間隙比などの変化により単一のイオン種に対しても分子拡散係数が大きく変化する事が予想される。そこで、本研究では粘土の間隙比、過圧密比と分子拡散係数の関係を明確にする事を目的としてカラム試験器を用いたトレーサー溶液による透水試験(以後、カラム試験)を行い、それらの関係について考察している。

また、粘土を用いたカラム試験では、粘土の膨潤を防ぐために載荷状態で透水試験を行わなければならない事や粘土の透水係数が低い小さい動水勾配を付与して行えば試験に非常に長時間を要し、大きな動水勾配を付与して行えば水みち流れの発生のおそれがあるなど試験自体が非常に困難である事が知られている。このようなカラム試験の実施上の問題により試験の際に仮定した境界条件、初期条件などが厳密には保たれない事が、測定される分子拡散係数の誤差要因となる可能性がある。そこで本研究では、カラム試験を用いて測定された分子拡散係数に含まれるおそれのある誤差について数値解析を用いて定量評価し、比較的短時間で簡易に分子拡散係数を測定する事が可能な試験方法の開発、試験条件の提示を前述の内容と併せて研究目的としている。

本論文は、全 5 章で構成されている。1. では研究の背景と目的について、2. では試験材料とカラム試験の試験方法について詳述している。3. ではカラム試験の結果に既往の研究で提案された簡便な分子拡散係数の算出法を適用し、分子拡散係数と間隙比、過圧密比の関係を求めている。4. ではカラム試験により測定された分子拡散係数の誤差を定量評価し、その誤差が無視し得る試験条件について考察している。5. では前述の議論から結論を導いている。

2. 試験概要

(1) 試験装置と試験材料

図-1 に本研究で用いたカラム透水試験器を示す。このカラム試験器の特徴はペロフラムシリンダーによる圧密圧力と空圧として付与されるセル圧を独立に制御できる事である。これにより、供試体に付与する圧密圧力と動水勾配の独立な制御が可能となっている。

試験材料にはカオリン粘土(ASP100)を用いた。カオリン粘土の物理的特性と粒径加積曲線を表-1 と図-2 にそれぞれ示す。本研究で用いたカオリン粘土は、市販されているカオリン粘土の中では、粒径が小さく、圧縮性が高い。また、ベントナイトなどと比較して大きな透水性を持ち、化学的活性が低い事がその特徴として挙げられる²²⁾。遮水ライナーを模擬した透水試験を行う際には、実際に遮水ライナーの材料として用いられるベントナイト混合土などを用いる事が望ましい。しかし、ベントナイト混合土の透水係数は非常に低く試験期間が長期化する事や汚染物質に対する吸着性が非常に高いため、移流拡散現象が遅延し、その現象が不明瞭となる事が予想され

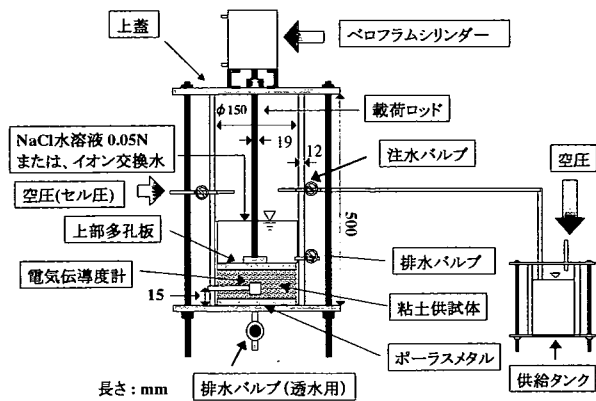


図-1 カラム透水試験器

表-1 カオリン粘土の物理特性

液性限界 $W_L(\%)$	77.50
塑性限界 $W_P(\%)$	30.30
塑性指数 I_P	47.20
比重	2.58
圧縮指数 C_c	0.61
膨潤指数 C_s	0.093
間隙比 (at 100kPa)	1.67
平均粒径 $d_{50}(\mu m)$	0.4
活性度	0.54

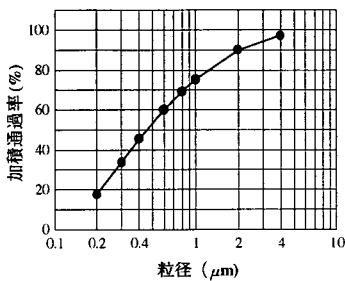


図-2 カオリンの粒径加積曲線

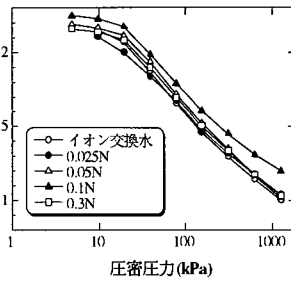


図-3 圧密試験から求めた間隙比と圧密圧力の関係

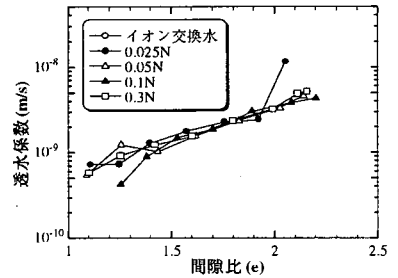


図-4 圧密試験から求めた透水係数と間隙比の関係

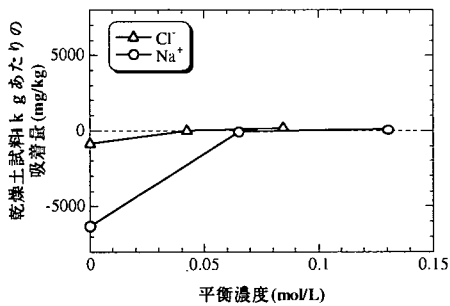


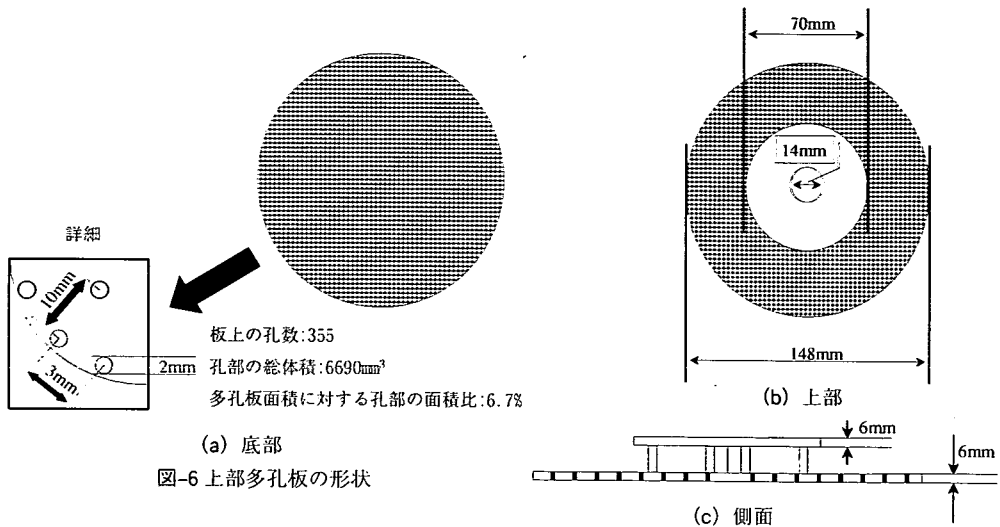
図-5 Na^+ と Cl^- の等温吸着線

一方、カオリンは透水係数が高く、カオリンを用いる事によりベントナイト混合土などを用いた場合と比較して試験に要する時間を短縮できる事や吸着性が低いため、移流拡散現象に対する遅延性が低く、移流拡散現象の観察が容易である事が予想される。本研究の目的は、粘土中の分子拡散係数や透水係数の簡易な測定法やその試験装置の開発であるため、多くの試験を行う必要があり試験材料としての利便性からカオリンを採用した。

カオリンは、化学的活性が低いため、間隙水中に存在するイオンとの相互作用は小さいと考えられるが、

トレーサー溶液として用いた NaCl 水溶液中の Na^+ , Cl^- の存在がカオリン粘土の物理特性に何らかの影響を及ぼす可能性が皆無であるとは言えない。そこで、濃度の異なる NaCl 水溶液を用いて練り混ぜたカオリン粘土スラリーにより圧密試験を行い、その影響を調べた。その圧密試験から得られた $e-\log(p)$ 関係を図-3 に、また、透水係数と間隙比の関係を図-4 にそれぞれ示す。図-3 でケースごとに間隙比の若干の相違が見られるが、濃度の大小とは無関係である事が分かる。この間隙比の相違は、スラリー状態のカオリンを準備する際に生じた初期含水比のばらつきによるものと思われる。これらより、今回用いたカオリン粘土では間隙水中に陽イオンが存在していても、本試験で用いた濃度の範囲であれば、圧密特性は変化しない事が確認できる。また、図-4 でも透水係数と間隙比の関係には、純水を用いて準備したスラリーと濃度の異なる NaCl 水溶液を用いて準備したスラリーで作製した供試体の結果に差は見られない。

図-5 にカオリン粘土粒子に対する Na^+ と Cl^- のバッチテストによる吸着試験の結果を示す。正で表される量は吸着量を示し、負で示される量は脱着量を示す。濃度 0 mol/L で表されるイオン交換水を用いた吸



着試験では、結果として粘土粒子から Na⁺, Cl⁻ の脱着が見られる。これはカオリン粘土自体にある程度の NaCl が含まれている事を意味している。前述の種々の濃度のスラリーを用いた圧密試験の結果に相違が見られなかったのは、この事に起因していると思われる。また、トレーサー溶液として用いた NaCl 水溶液の濃度 (0.05mol/L) での Na⁺ と Cl⁻ のカオリン粒子に対する吸着量は極めて微量であるためトレーサー溶液全体に含まれるイオンの総量と比較すると無視できる量であると考えられる。以上の事からカオリン粘土と NaCl 水溶液を用いて移流拡散に着目した試験を行う際には、吸着現象をほぼ無視する事ができるため、NaCl は理想的なトレーサーのひとつであると判断できる。

(2) 試験手順と試験条件

カオリン粘土の粉末をイオン交換水を用いて、含水比 120~130%のスラリー状態になるように練り混ぜ、スラリー状のカオリン粘土を準備する。この練り混ぜは気泡の混入を防ぐために、脱気槽内で行った。カラム底部のポーラスメタルの上にもろ紙を敷き、イオン交換水により作製した脱気水 (以後、脱気水) を深さ 100mm 程度までカラム容器内に注水し、その中に粘土スラリーを空気の混入がないようにならしながら層厚が 80mm 程度になるように投入する。スラリー投入後、上部にもろ紙を敷き、図-6(a), (b), (c) に示すような直径 2mm の孔が多数開いた載荷板 (以後、多孔板) を取り付けた載荷ロッドを設置し、カラム試験器の上蓋を締め密閉する。次いで載荷用のペロフラムシリンダーを上蓋に取り付け、ペロフラムシリンダーに載荷ロッドを固定し、予備圧密の準備を完

了する。準備した粘土スラリーに対して 9.8kPa から 2 倍増分で段階的に載荷を行い、正規圧密供試体の場合には所定の圧密圧力 P_b まで予備圧密を行う。

予備圧密の終了確認後、供試体下端から 15mm の位置のカラム側面に、電気伝導度計 (以後、電導度計) を挿入する。電導度計は直径が約 10mm であり、供試体の高さが 50mm ほどである事から電導度計を挿入する事により供試体、または流れの場が攪乱される可能性ある。この攪乱により生じる測定誤差については、4. (3)b) で詳述している。

本試験では、図-7 に示す 4 極式の電導度計を用いた。この 4 極式電導度計の出力は多孔質体の間隙率の影響を受けるが、出力値と濃度の間には、常に線形の関係がある。従って、濃度計測では、カラム試験開始時の出力を $C=0$ 、試験後半に出力が一定となった時の値を $C=0.05\text{mol/L}$ (NaCl) に対するものとして濃度-時間関係を求めた。正規圧密供試体に対する試験の場合、電導度計挿入後、カラム試験と同等のセル圧 (P_a) を付与する事により脱気水を透水させ、透水圧密を行う。この透水圧密は、カラム試験の結果に対する試験中の供試体内の間隙比変化や圧密現象による非定常な水の流れの影響を抑えるためのものである。透水圧密の際、カラム容器下端の排水口は開かれ、大気圧中に解放されており、透水圧密中に粘土に付与される動水勾配は、 $P_a / (h_c \cdot \gamma_w)$ で表される。ここで、 h_c は供試体厚さ、 γ_w は水の単位体積重量である。一方、過圧密供試体を準備するためにはトレーサー透水時の載荷圧より大きい鉛直圧 (P_{bc}) をペロフラムシリンダーにより付与し、この圧密終了後、鉛直圧を P_b まで除荷し、正規圧密供試体同様、透水圧密を行う。正規圧密および過圧密供試体の圧密圧力と付与した

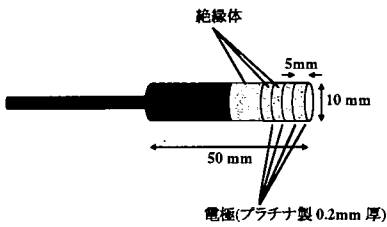


図-7 4極式電気伝導度計

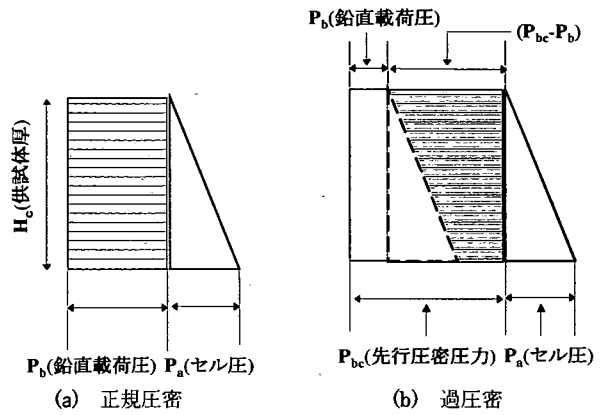


図-8 圧密圧力とセル圧の関係

表-2 試験条件の詳細

テストコード	応力履歴	先行圧密圧力 P_{bc} (kPa)	圧密圧力 P_b (kPa)	セル圧 P_a (kPa)	供試体の間隙比の範囲 (平均値)	流入端から電導度計までの距離 L (m)	排水量から求めた V_{in} (m/s) $\times 10^{-7}$	濃度変化から求めた V_{in} (m/s) $\times 10^{-7}$	正規化したブレイクスループの傾き ($C/C_0=0.5, V/V_0=1.0$)	供試体長 (m)	動水勾配
NC33	正規圧密	33	33	50	$1.76 < e < 2.02$ (1.87)	0.036	5.04	3.95	1.44	0.046	111
NC58		58	33		$1.68 < e < 1.86$ (1.76)	0.032	3.47	2.65	1.27	0.042	121
NC81		81	81		$1.63 < e < 1.76$ (1.69)	0.037	2.90	2.57	1.56	0.048	106
NC120		120	120		$1.55 < e < 1.65$ (1.60)	0.028	2.64	1.85	1.27	0.040	128
OC38	過圧密	150	38		$1.61 < e < 1.67$ (1.63)	0.035	2.52	1.83	1.43	0.046	109
OC50			50		$1.61 < e < 1.67$ (1.63)	0.036	2.49	1.57	1.64	0.045	113
OC100			100		$1.56 < e < 1.62$ (1.59)	0.037	1.89	1.46	1.65	0.047	111

動水勾配から生じる透水力の関係(鉛直載荷圧力分布)を図-8(a), (b)に示す。予備圧密、透水圧密ともにその終了は \sqrt{t} 法²³⁾により確認した。

透水圧密終了後、セル圧を付与したまま、カラム容器側面の排水口を開けてカラム内の水を速やかに排水する。カラム内の水量が少なくなってきたら、セル圧をゼロにして棒状にねじったペーパータオルを排水口から挿入し、残った水を吸収し、可能な限りカラム内の水を除去する。カラム内の水を除去する事は、トレーサー溶液の希釈による供給濃度の不均一性を防ぐために非常に大切な作業である。その後、カラム試験器に接続されたトレーサー溶液供給タンクにカラム試験に用いるセル圧よりやや小さい圧力を付与し、トレーサー溶液を注入する。注入の際には、カラム試験器を手でかろく振動させる事により、試験器内のトレーサー溶液を攪拌する。セル圧除荷による

供試体の膨潤を極力抑え、3.(1)で記述するステップファンクションを想定した初期条件、境界条件を満たすために、供試体上部の水とトレーサー溶液の置換作業は2分以内に完了させた。

トレーサー溶液の注入終了と同時に $P_a=50$ kPa のセル圧を付与し、カラム透水試験(以後、カラム試験)を開始する。カラム試験では、浸出水量をメスシリンダーで測定し、間隙水のトレーサー濃度を供試体内に挿入した電導度計により測定する。排水量と経過時間の関係を図-9に示す。排水量と経過時間の関係は原点を通過する直線となっており、カラム試験開始時からほぼ定常流となっていた事が確認できる。電導度計により測定した間隙水のトレーサー濃度がピーク値付近で一定値を示している事を確認した後、カラム試験を終了する。尚、短時間に多くの試験を消化する事を想定し、1 ケースの所要時間が予備圧密、

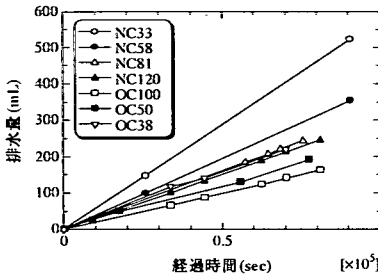


図-9 排水量と経過時間

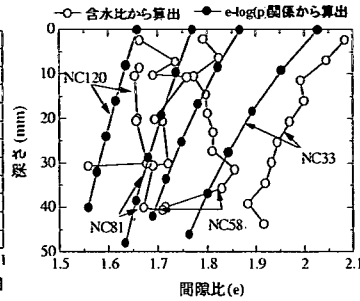


図-10 含水比より求めた e と応力履歴より求めた e の比較(正規圧密)

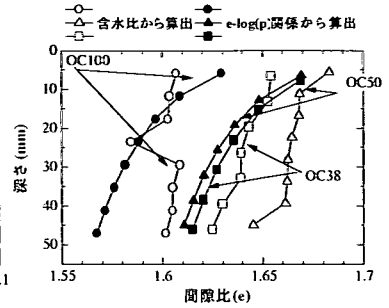


図-11 含水比より求めた e と応力履歴より求めた e の比較(過圧密)

透水試験を合わせて 1 週間程度となる様にセル圧 (50kPa) を決定している。また、温度変化による土の特性の変化、センサーのドリフト等を避けるため、試験は室温、並びに脱気水、NaCl 溶液の温度を 18°C に保った状態で行った。試験終了後、サンプラーによって供試体の一部から試料を採取し、深さ方向に約 5mm 毎に切り出し、深さ方向の含水比分布を測定した。図-10, 11 に含水比から求めた空隙比およびに応力履歴とカオリン粘土の $e-\log(p)$ 関係から求めた空隙比の供試体内の深さ方向の分布を正規圧密、ならびに過圧密供試体についてそれぞれ示す。測定値にはかなりのばらつきがあり、全体的に含水比から求めた空隙比の方が大きくなっている事が分かる。これは、試験終了時に載荷圧を除荷した際に生じた供試体の膨潤が影響していると考えられる。しかし、各試験条件による相対的な大小関係は一部で逆転しているものの両方で概ねよい対応を示している事から、本研究の試験結果の整理に用いる空隙率の決定には応力履歴から求めた空隙比を用いた。また、コラム試験終了後、電導度計の供試体上面からの距離 (L) も計測した。本試験で行った各試験条件を L も含め表-2 にまとめて示す。

3. 試験結果及びに考察

(1) 流体力学的分散係数の算出法

2. (1) で確認したように、カオリン粘土にトレーサー溶液として NaCl 水溶液を用いた場合、吸着の影響は無視できる。このような場合、一次元の移流拡散方程式は、吸着の影響を表す項を含まない式(1)となる²⁴⁾。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{hl} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V_{im} \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

ここで、 C は空隙流体中の対象物質の濃度、 t は経過

時間、 D_{hl} は流体力学的分散係数(以後、分散係数)、 x は流れ方向の座標、 V_{im} は空隙内平均流速であり、 D_{hl} は式(2)のように粘土中の分子拡散係数(D)と粘土中の機械的分散係数(D_{mech})の和で与えられる。

$$D_{hl} = D^2 + D_{mech} \quad (2)$$

式(1)を式(3)のようなステップファンクションで与えられる初期条件、境界条件のもとで解くと、その解は式(4)の様になる²⁴⁾。

$$t = 0 \quad x < 0 \quad C = C_0 \quad (3a)$$

$$x \geq 0 \quad C = 0$$

$$t \geq 0 \quad x = 0 \quad C = C_0 \quad (3b)$$

$$x = \infty \quad C = 0$$

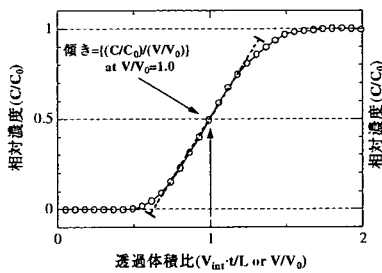
$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x - V_{im}t}{2\sqrt{D_{hl}t}} \right) + \exp \left(\frac{V_{im}x}{D_{hl}} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x + V_{im}t}{2\sqrt{D_{hl}t}} \right) \right] \quad (4)$$

ここで $f(\phi) = \operatorname{erfc}(\phi)$ は以下に示す様な補誤差関数である。

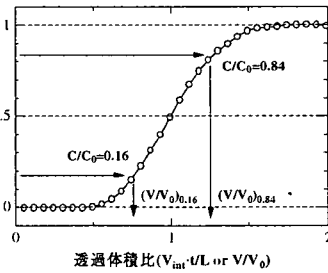
$$\operatorname{erfc}(\phi) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\phi}^{\infty} e^{-x^2} dx \quad (5)$$

コラム試験の結果を用いて分散係数を算出する方法として式(4)の厳密解を試験から得られた濃度-時間関係(ブレイクスルーカーブ)にフィッティングするものが考えられる。しかし、厳密解の取り扱いの困難さから、式(4)右辺第 2 項を無視した式(6)の省略解を用いた分散係数の算出法が Greenkorn²⁵⁾ や Brigham²⁶⁾ により提案されている。

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x - V_{im}t}{2\sqrt{D_{hl}t}} \right) \right] \quad (6)$$



(a) Greenkorn の方法



(b) Brigham の方法

図-12 流体力学的分散係数の算出

表-3 厳密解と省略解の比較

	D_{hl} (m^2/s)	厳密解との差 (m^2/s)	差/厳密解 $\times 100(\%)$
NC120			
Closed form	2.99×10^{-10}	0	0
Greenkorn	3.06×10^{-10}	6.9×10^{-12}	2.3
Brigham	3.00×10^{-10}	1.1×10^{-12}	0.4

Greenkorn²⁵⁾は縦軸を相対濃度(C/C_0), 横軸を透過体積比($V_{int} \cdot t/L$)とした正規化したブレイクスルーカーブを用いて分散係数を算出する方法を提案した. ここで, 透過体積比は正規化した時間であるが, その物理的な意味は, 時間 t においてトレーサー溶液で置換された間隙体積 ($V=nAV_{int}t$) と流入端から L 離れた計測点 (ここでは電導度計の位置) までの土中の間隙体積 ($V_0=nAL$) との比であり, そのため V/V_0 で表される事が多い. 尚, n は間隙率, A は供試体の流下方向の断面積を表す.

式(6)を x で一階微分し, $x=V_{int}t (=L)$ となる点の勾配を求めると式(7)となり²⁵⁾,

$$\left(\frac{\partial(c/c_0)}{\partial x}\right)_{x=V_{int}t} = \frac{1}{\sqrt{4\pi D_{hl} L} \cdot V_{int}} \quad (7)$$

これを D_{hl} について解く事により式(8)を得る²⁵⁾.

$$D_{hl} = \frac{1}{4\pi} \frac{V_{int} L}{\left(\frac{\partial(c/c_0)}{\partial(V/V_0)}\right)_{V/V_0=1}^2} \quad (8)$$

これを用い, 式(8)中の右辺の分母にある正規化したブレイクスルーカーブの $V/V_0=1$ での勾配を図-12(a)に示すように実測のブレイクスルーカーブより求める事により, 流体力学的分散係数を算出する

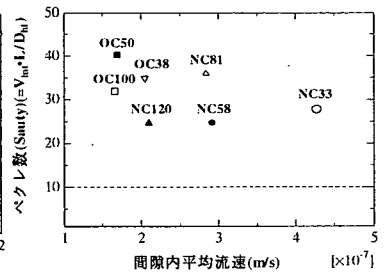


図-13 ペクレ数(Sauty)と間隙内平均流速の関係

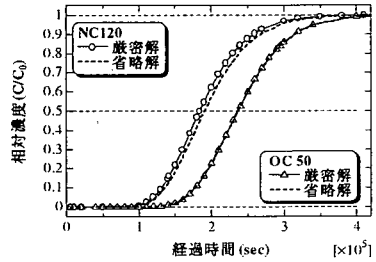


図-14 移流拡散方程式の厳密解と省略解の比較

事ができる.

一方, Brigham²⁶⁾は正規確率紙(横軸が等間隔に, 縦軸が確率 $f(x)$ で目盛られた不等間隔のグラフ用紙, この $f(x)$ は $f(-\infty)=0: f(0)=0.5: f(\infty)=1$ であり, $0 \leq f(x) \leq 1$ の条件からなる $f(x)$ と x との関係は座標軸上で直線となる. つまり, 確率紙上で直線であれば正規分布と見なす事ができる)上に正規化濃度と正規化時間の関係をプロットし, その関係が直線になる事を利用し, 図-12(b)で示すように $C/C_0=0.16, 0.84$ 時の V/V_0 を実測ブレイクスルーカーブより求め, 式(9)を用いて分散係数を算出する方法を提案した.

$$D_{hl} = \left(\frac{V_{int} L}{8}\right) (J_{0.84} - J_{0.16})^2 \quad (9)$$

ここで

$$J_{0.84} = \left[(V/V_0 - 1) / (V/V_0) \right]_{C/C_0=0.84}^{0.5} \quad (9a)$$

$$J_{0.16} = \left[(V/V_0 - 1) / (V/V_0) \right]_{C/C_0=0.16}^{0.5} \quad (9b)$$

本研究では主に, 省略解による解法を用いたが, 以下に厳密解と省略解の差異を検討する.

図-13 は各試験における Sauty²⁷⁾ が与えたペクレ数(Sauty) ($=V_{int}L/D_{hl}$) を間隙内流速に対してプロッ

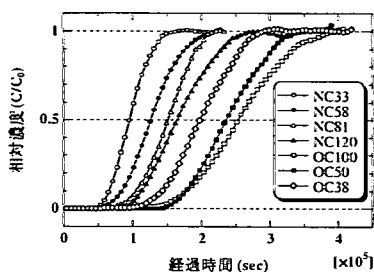


図-15 相対濃度と経過時間の関係

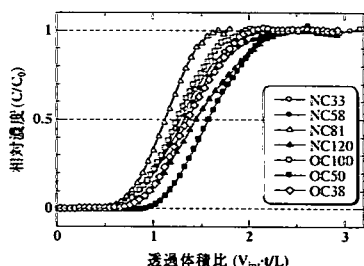


図-16 排水量から決定した流速を用いて算出したブレイクスルーカーブ

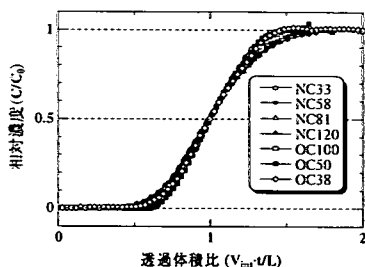


図-17 $C/C_0=0.5$ $V/V_0=1.0$ が一致する様に決定した流速を用いて算出したブレイクスルーカーブ

としたものである。ペクレ数(Sauty)が 10 以上である場合、省略解を用いた分散係数の算出が妥当である事が確認されている²⁷⁾。本研究で行われたすべてのケースで、ペクレ数(Sauty)は 10 以上になっているが、確認の意味でペクレ数(Sauty)が最も小さい実験ケース(以後、ケースNC120とペクレ数(Sauty)が最も大きいケース OC50)について厳密解と省略解を用いて算出したブレイクスルーカーブの比較を行った結果を図-14に示す。尚、計算を行うために必要なパラメータである間隙内平均流速、分散係数、流入端から電導度計までの距離などは、すべてカラム試験から得られたものを使用した。図中のそれぞれの曲線がほぼ同様な形状を示し、重なっている事が分かる。また、Greenkorn²⁵⁾の方法とBrigham²⁶⁾の方法を適用し求めた分散係数と厳密解における分散係数の差は、ペクレ数(Sauty)が最も小さいケースNC120でも表-3に示されるように3%未満に収まる事が分かる。従って本研究の条件では省略解を用いて分散係数を算出しても、その誤差は3%未満に収まっている事が確認できる。

(2) カラム試験の結果

図-15に相対濃度 C/C_0 と経過時間 t の関係(ブレイクスルーカーブ)を示す。ここで相対濃度とは、試験開始時に電導度計が示す初期濃度(元来、粘土中に含まれるイオンの濃度)に由来する測定濃度を示す。これにより、電導度計の測定濃度はトレーサー溶液の流入前にもゼロにはならないをゼロに調整し、各試験の濃度のピーク値で各時間の測定濃度を除し、正規化したものである。これらの曲線の形状は Na^+ と Cl^- の粘土中での流体力学的分散現象に密接に関係しているが、その形状は、間隙内平均流速や流入端から電導度計の位置までの距離などにより変化するのであるため、これらの曲線を直接比較する事は出

来ない。そこで、3.(1)で説明したように透過体積比を用いて時間軸を正規化し、各ブレイクスルーカーブを比較する。

式(6)に示す省略解によれば、正規化時間が1になった時に、相対濃度は0.5である。しかし、図-9に示すカラム試験の排水量と $e-\log(p)$ 関係から求めた間隙比を用いて間隙内平均流速を算出し、透過体積比(V/V_0)を求めるとブレイクスルーカーブは図-16に示される様に、正規化時間が1になった時に、正規化濃度は0.5に達しなかった。この不一致の原因としては、後述する上部多孔板の影響のほかにかラム内壁と粘土の境界での水みち流れの発生が考えられる。この水みち流れとは、約50mmの粘土供試体に比較的大きな圧力差(50kPa)を付与するため粘土とカラム内壁の付着の悪い部分を水が選択的に流れているというものである。試験の際には、カラム内壁に遮水用のシリコングリースを塗布し、極力、水みち流れの発生を防ぐ努力をしたが、層厚が小さい事とセル圧が大きい事から、水みち流れの発生を完全に防ぐ事ができなかったものと考えられる。しかし、層厚50mmに対し直径は150mmと比較的大きな供試体であるため、このカラム側面の流れは供試体中央部の流れには大きな影響は与えないものと考えられる。そこで、正規化濃度が0.5になった時の経過時間で流入端から電導度計までの距離を割る事により間隙内平均流速(V_{int})を求め、これを用いた透過体積比で整理し、図-17に示すように正規化したブレイクスルーカーブを描いた。以上の様にして求めた各ケースの V_{int} と Greenkorn²⁵⁾の算出法で用いる正規化ブレイクスルーカーブの等価体積比1における勾配を表-2に示してある。

図-17の正規化ブレイクスルーカーブを用いて3.(1)で説明した2つの方法により求めた分散係数と間隙内平均流速から算出した透水係数をそれぞれの

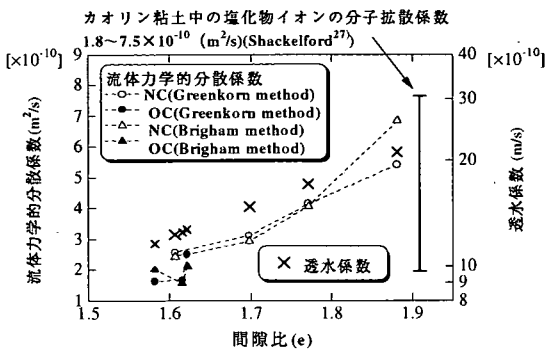


図-18 流体力学的分散係数,透水係数と間隙比の関係

供試体の平均間隙比に対してプロットしたものを図-18に示す。過圧密供試体のケースで若干のばらつきは見られるが、間隙比の減少に伴い分散係数も減少し、間隙比の1.6~1.9(間隙率:0.62~0.66)の変化に対して、分散係数は約3倍変化している。評価方法の差は殆どなく、間隙比と分散係数の関係に正規圧密と過圧密供試体の差は見られない。図には間隙比と透水係数の関係も示してあるが、上記の間隙比の範囲では、間隙比の変化に対する分散係数の変化割合が透水係数のそれとかなり類似している事も分かる。一方、図-17や表-2に示したように各試験ケースから得られる正規化されたブレイクスルーカーブの $V/V_F=1.0$ における勾配には大きな差は見られない。Greenkorn²⁵⁾の方法を分散係数の算出に用いた場合、分散係数は、曲線の最急勾配部の勾配、電導度計までの距離、流速の三種類の量に依存している。ここでは、曲線の勾配、電導度計までの距離は各ケースで大きな差が見られないため、結果として、本試験で得られた各ケースの分散係数の差は、各ケースの間隙内平均流速に大きく依存していたと言える。

図-18中に示される様に本試験で得られた流体力学的分散係数の範囲は、Shackelford²⁸⁾が報告しているカオリン粘土中のCl⁻の分子拡散係数の範囲とほぼ対応している。図-19は、Perkins and Johnston²⁹⁾が示した D_{hi}/D_d (ここで、 D_{hi} :無限希釈溶液中の分子拡散係数)とペクレ数(Perkins)($=V_{int} d_{50}/D_{hi}$ 、ここで d_{50} :平均粒径)との関係であるが、これに本試験の結果をプロットするとすべてのケースで分子拡散が支配的な領域にある事が分かる。このように粘土供試体の場合、本研究で用いた約100という高い動水勾配においても、流体力学的分散は主に分子拡散によって支配されていると言える。したがって、本試験で求まる流体力学的分散係数は分子拡散係数にほぼ等しくなり、式(2)は次のように表せる。

$$D_{hi} \doteq D^* \quad (10)$$

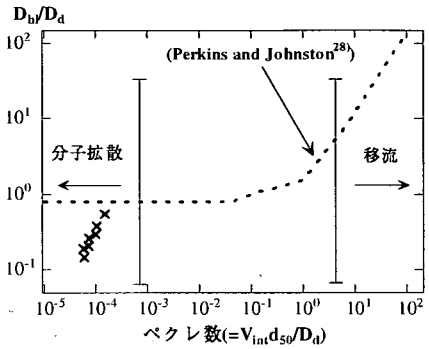


図-19 ペクレ数による移流支配と拡散支配の区分

以後、試験結果は分子拡散係数として表示する。

粘土中の分子拡散係数は流路曲折度 τ と無限希釈水溶液中の分子拡散係数 D_d の積として、次式で表される。

$$D^* \doteq \tau D_d \quad (11)$$

Cl⁻の D_d ($1.5 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$)²⁸⁾を用いると、今回の試験の範囲ではカオリン粘土(ASP100)に対するNaClの流路曲折度 τ の範囲は $0.10 < \tau < 0.34$ となる。ここでも、Shackelford²⁸⁾が示したCl⁻に対するカオリン粘土の τ の範囲($0.12 < \tau < 0.50$)と良く対応しており実験の妥当性を確認できる。

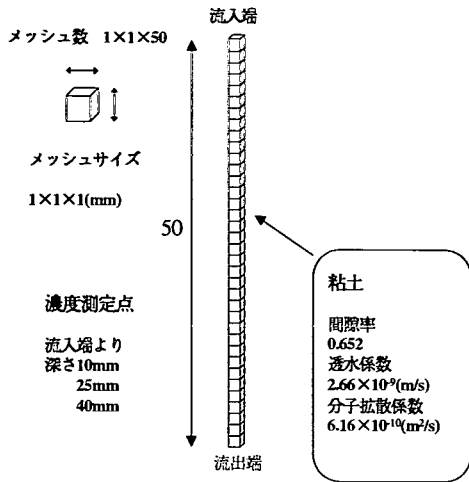
4. 誤差要因の検討

本研究で行われたカラム試験は、幾つかの不可避な誤差要因を含んでいる。中でも、特に重要であると思われるものとして、(1)供試体上部の多孔板の影響、(2)試験時間短縮のため、大きな動水勾配を付与した事により生じる透水圧密に起因する流れ方向の間隙比の不均一性の影響、(3)供試体中の流下距離 L に対して無視しえない電導度計の大きさの影響等が考えられる。

(1) 供試体上部の多孔板の影響

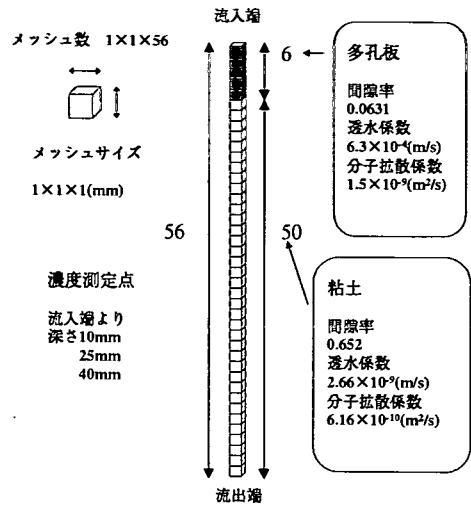
図-6(a), (b), (c)に示す多孔板は供試体に一定の载荷を行いながらの透水を可能とするために用いられるものであり、一定間隔に孔がつけられた鉄板である。一様な変位を供試体上面に与える為にはある程度の剛性、即ち厚みが必要となる。カラム試験の際には、透水圧密終了を確認した後、セル内の水とトレーサー溶液を置換するが、多孔板の孔内の水を完全に除去する事は難しい。そのためセル内にトレーサー溶液を注入し、カラム試験を開始した直後に、供試体に浸透するトレーサー溶液の濃度は、多孔板付近

NC33(cell 50)



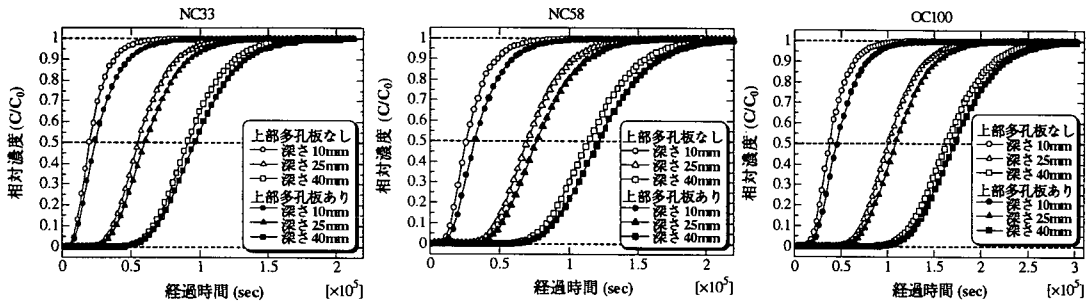
(a) 上部の多孔板なし

NC33(cell 50)



(b) 上部の多孔板あり

図-20 上部の多孔板を考慮した計算に用いた解析メッシュ



(a) ケース NC33

(b) ケース NC58

(c) ケース OC100

図-21 上部の多孔板が濃度上昇に及ぼす影響

で希釈され、低くなっている事が予想される。これにより、希釈がない場合と比較して、特に濃度上昇初期部の立ち上がり不明確になったり、また、多孔部に溜まった水の体積分はトレーサー溶液の到達の遅延が生じる。そして、その結果として、供試体上面を境界として設定した式(3)で与えられる境界条件、初期条件が厳密には保たれていないという事が考えられる。分子拡散係数の算出の際には濃度境界が供試体内に流入後、拡散する事を仮定している、初期条件が厳密に満たされずに境界付近で試験開始前に分子拡散が生じた場合、分子拡散係数の過大評価につながる。

James and Rubin³⁰⁾は、多孔板部と供試体部を考慮した2層モデルを提案し、多孔板による誤差を定量的に評価している。本研究では、より簡便な評価法を目指す意味で多孔板の影響を無視して1層モデルを仮定し、分子拡散係数を求めたが、実際にはこの単純

化が算出される分子拡散係数にどの程度の影響を及ぼすのかを検討するために、以下の様に汎用移流解析プログラム MODFLOW, MT3D を用いた数値解析を行った。すなわち、供試体上部にカラム試験で用いた多孔板と同等の間隙率、透水係数を持つ多孔質体を設置した場合としない場合の計算結果を比較し、供試体内のトレーサー濃度の上昇に多孔板の存在が与える影響について検討している。解析の際に用いた解析メッシュを図-20(a), (b)に示す。図-20(a), (b)中のカオリン粘土の透水係数、分子拡散係数などのパラメータは図-4, 図-18, ならびに Ozawa ら¹⁶⁾を参考に決定し、また多孔板部の孔内の分子拡散係数は、流路曲折度 τ を1と仮定して無限希釈溶液中のCl⁻の分子拡散係数 D_0 の値²⁸⁾を用いた。

すべての試験の中で流速の最も大きいケース NC33, 流速の最も小さいケース OC100, 及びそれらの中間の流速であるケース NC58 を模擬した計算より

表-4 上部の多孔板が濃度上昇に及ぼす影響

テストコード	深さ (mm)	上部多孔板あり 間隙内 平均流速 V_p (m/s)	上部多孔板なし 間隙内 平均流速 V_{np} (m/s)	多孔板あり 正規化ブレイクスルー カーブの $V/V_0=1.0$ に おける勾配 の 2 乗の逆数(G_{po})	多孔板なし 正規化ブレイクスルー カーブの $V/V_0=1.0$ に おける勾配 の 2 乗の逆数(G_{npo})	V_p/V_{np}	G_{po}/G_{npo}
NC33	10	4.2×10^{-7}	5.0×10^{-7}	2.29	1.89	0.84	1.21
	25	4.2×10^{-7}	4.5×10^{-7}	0.75	0.66	0.92	1.13
	40	4.2×10^{-7}	4.4×10^{-7}	0.45	0.41	0.95	1.11
OC100	10	2.2×10^{-7}	2.7×10^{-7}	1.71	1.37	0.82	1.25
	25	2.3×10^{-7}	2.5×10^{-7}	0.55	0.54	0.93	1.02
	40	2.3×10^{-7}	2.5×10^{-7}	0.33	0.31	0.95	1.06

表-5 上部の多孔板が D^* に及ぼす影響

テストコード	上部多孔板あり D_{H1} (m^2/s)	上部多孔板なし D_{H2} (m^2/s)	D_{H1} の差 (m^2/s)	差/ D_{H1} (上部ポーラスなし) $\times 100$ (%)
NC33	6.0×10^{-10}	5.7×10^{-10}	2.8×10^{-11}	4.9
NC58	4.3×10^{-10}	4.2×10^{-10}	1.2×10^{-11}	2.9
NC81	3.8×10^{-10}	3.7×10^{-10}	8.0×10^{-12}	2.2
NC120	2.6×10^{-10}	2.6×10^{-10}	4.6×10^{-12}	1.8
OC38	3.0×10^{-10}	2.9×10^{-10}	7.0×10^{-12}	2.4
OC50	3.0×10^{-10}	2.9×10^{-10}	5.0×10^{-12}	1.7
OC100	2.5×10^{-10}	2.4×10^{-10}	4.0×10^{-12}	1.7

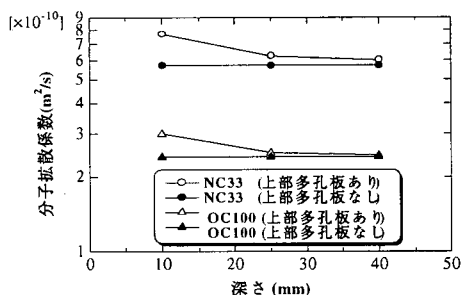


図-22 上部の多孔板が濃度上昇に及ぼす影響
(それぞれの深さにおける D^* の比較)

得られた結果を図-21(a)~(c)にそれぞれ示す。計算の結果は供試体深さ 10, 25, 40mm の位置でのブレイクスルーカーブで表してある。これらの図よりすべてのケースで、多孔板の存在により濃度の上昇が遅延している事が確認できる。表-4にケース NC33 とケース OC100 の条件において、相対濃度が 0.5 となる経過時間より求めた V_p (多孔質体がある場合の間隙内平均流速)、 V_{np} (多孔質体がない場合の間隙内平均流速) と Greenkorn の方法で D^* の算出に用いる等価体積比 1 における正規化ブレイクスルーカーブの勾配の 2 乗の逆数 (G_{po} , G_{npo})、並びにそれらの比を示す。 G_{po} , G_{npo} は式(8)の Greenkorn の方法を用いて D^* を算出する際に用いる数値で、算出される D^* の大小を左

右する因子のひとつである。この値が大きいほど分子拡散係数が大きく、小さいほど分子拡散係数が小さくなる。

流速の小さいケース OC100、流速の大きいケース NC33 共に、測定点が深くなるほど、相対濃度の比、勾配の 2 乗の逆数の比共に 1 に近づき、多孔板あり・なしのケースの差が小さくなっている事が分かる。この解析結果から、多孔板の存在は経過時間と濃度変化から求められる V_{int} を過小評価し、ブレイクスルーカーブより算出される分子拡散係数を過大評価する事が分かる。また、図-22 には、ケース NC33 とケース OC100 の各測定点において算出されたブレイクスルーカーブに Greenkorn の方法を適応し算出した分子拡散係数を各深さについて示してあるが、多孔板から遠くなるほど多孔板有りのケースから算出された分子拡散係数が入力値 (ここでは多孔板無しのケースの分子拡散係数) と近い値になるが、前者は常に後者より大きくなる事が分かる。本研究の試験では深さ約 35mm の位置を測定点としている。表-5 に示す深さ 35mm の測定点における多孔板あり、なしの計算値の差を比べると、前述の通りすべてのケースを通じて多孔板有りの場合が多孔板無しの場合より分子拡散係数を大きめに評価しているが、計算値の差異は最大で 5% 程度になる事が分かる。図-18 に示される様に本研究の試験条件で、分子拡散係数は約 3 倍変化している事から、供試体上部の多孔板により生じ

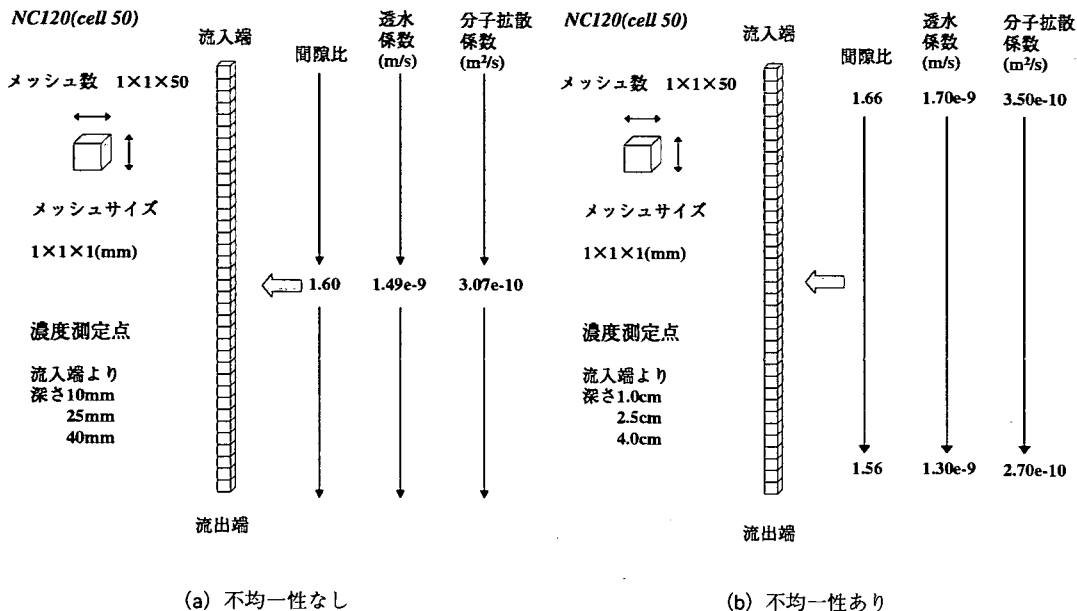


図-23 供試体内の深さ方向の不均一性を考慮した計算の解析メッシュ

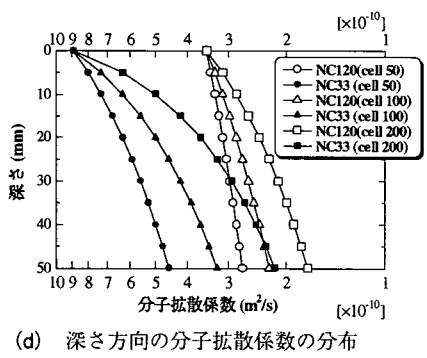
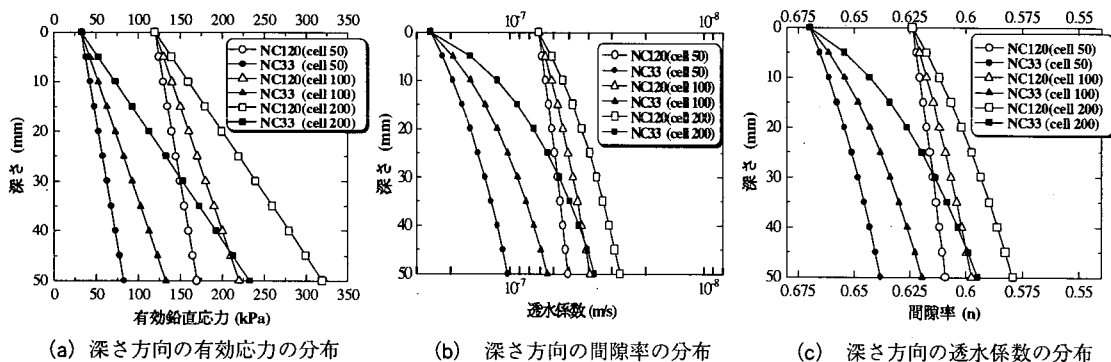


図-24 数値解析に用いた各種パラメーター

(2) 流下方向に生じる間隙比の不均一性の影響

本研究では、難透水性である粘土供試体に対してカラム試験を行う際に、試験時間短縮のために、供試体上面に水圧を付与する事により大きな動水勾配を作用させている。これにより付与された圧力は図-8に示す様に供試体上端ではすべて間隙水圧となり、供試体下端ではすべて有効応力となる。そのため、供試体内部に透水圧密が生じ、深さ方向に間隙比の不均一性が生じている³¹⁾。間隙比に不均一性が生じるという事は、透水係数、分子拡散係数にも不均一性が生じているという事である。この事から、カラム試験の結果として算出された各試験に対する分子拡散係数は、深さ方向に分子拡散係数が不均一に分布する粘土供試体内部の深さ 35mm での測定値となる。供試体内部では、厳密には、上端付近で間隙比が大きくな

た 5%前後の誤差は無視しうるものであると判断できる。

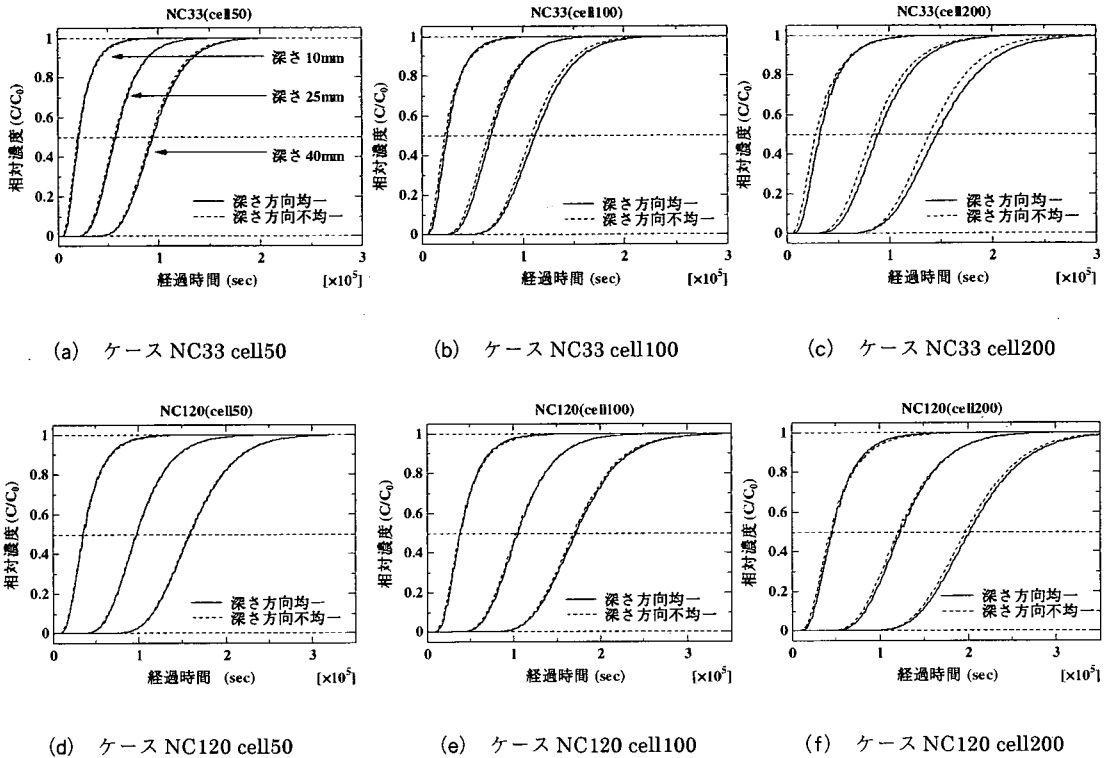


図-25 深さ方向の不均一性が濃度上昇に及ぼす影響

っているため分子拡散係数も大きく、下端に向かうほど分子拡散係数は小さい事が予想される。分子拡散係数の算出の際に用いる式(1)は、供試体が均一である事を仮定しているため、付与する動水勾配が大きくなり、透水圧密による供試体内の深さ方向の間隙比の分布が大きくなるほど、算出される分子拡散係数に含まれる誤差が大きくなると思われる。そこで、その誤差を定量評価するために深さ方向に、間隙比、透水係数、分子拡散係数が不均一を持つ供試体と各係数が上記の平均値を持ち、深さ方向に均一な供試体の2種類を想定し、MODFLOW、MT3Dを用いて数値解析を行った。この解析において、深さ方向に不均一なケースは実際のカラム試験の供試体を模擬しており、深さ方向に均一なケースはOgata and Banks²⁴⁾が移流拡散方程式を解く際に想定した均一な供試体を模擬している。この両者の解析結果の比較から、供試体の深さ方向の不均一性がカラム試験の結果に及ぼす影響や不均一な供試体から得られる測定結果に均一な供試体を仮定した算出法を適用する事により生じる誤差について検討した。

図-23(a), (b)に不均一性を考慮した計算の解析メッシュを示す。解析は各濃度測定点(深さ10, 25, 40mm)の濃度-時間関係を求めるものである。間隙比が深さ方向に変化していくケースでは、セル圧として、50, 100, 200kPaを想定し、ペロフラムシリンダーからの圧密圧力として33, 120kPaを想定した。これは、上記の圧密圧力で圧密した供試体を、上記のセル圧で透水圧密し、その後トレーサー溶液を用いてカラム試験を行う正規圧密供試体に対する試験を模擬した計算になっている。圧密圧力33, 120kPaは本研究のカラム試験で行われた試験の中から選択したもので、最も間隙比の変化が大きいのものがケースNC33で、最も変化が小さいのがケースNC120である。計算の際に設定した有効鉛直応力(圧密圧力)、間隙率、透水係数、分子拡散係数の分布は図-24(a)~(d)に示す通りである。尚、図-24(c)の関係は、図-4の関係に対する回帰直線から、図-24(d)の関係は図-18の関係に対する回帰直線からそれぞれ算出した。

表-6 深さ方向の不均一性がD*に及ぼす影響

テストコード	D* _{meas2} (m ² /s) (不均一性地盤)			D* ₁ (m ² /s) (均一性地盤)	D*の差 (不均一性地盤 深さ40mm における D* _{meas2} と 均一性地盤の D* ₁ との比較)	(D*の差)/ (均一性 D* ₁) ×100(%)
	深さ 10(mm)	深さ 25(mm)	深さ 40(mm)			
NC33 (Cell 50)	8.5×10 ⁻¹⁰	7.1×10 ⁻¹⁰	6.3×10 ⁻¹⁰	6.2×10 ⁻¹⁰	1.0×10 ⁻¹¹	1.6
NC33 (Cell 100)	7.4×10 ⁻¹⁰	6.1×10 ⁻¹⁰	5.2×10 ⁻¹⁰	5.1×10 ⁻¹⁰	1.0×10 ⁻¹¹	2.0
NC33 (Cell 200)	6.6×10 ⁻¹⁰	4.8×10 ⁻¹⁰	4.0×10 ⁻¹⁰	4.0×10 ⁻¹⁰	0	0
NC120 (Cell 50)	3.7×10 ⁻¹⁰	3.3×10 ⁻¹⁰	3.2×10 ⁻¹⁰	3.1×10 ⁻¹⁰	1.0×10 ⁻¹¹	3.2
NC120 (Cell 100)	3.5×10 ⁻¹⁰	3.1×10 ⁻¹⁰	2.9×10 ⁻¹⁰	2.8×10 ⁻¹⁰	1.0×10 ⁻¹¹	3.6
NC120 (Cell 200)	3.3×10 ⁻¹⁰	2.8×10 ⁻¹⁰	2.5×10 ⁻¹⁰	2.4×10 ⁻¹⁰	1.0×10 ⁻¹¹	4.2

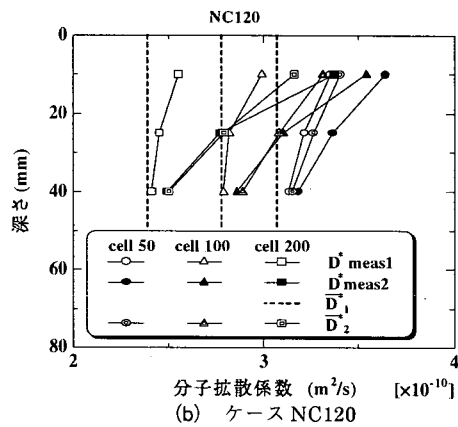
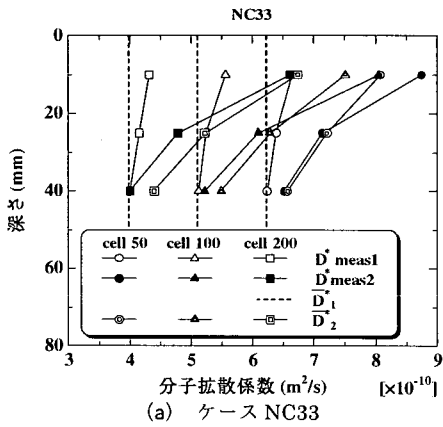


図-26 各深さにおけるD*の評価値と平均値の比較

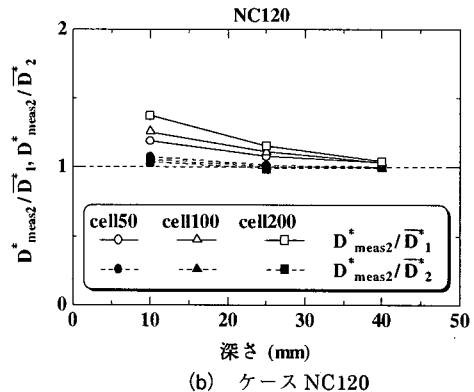
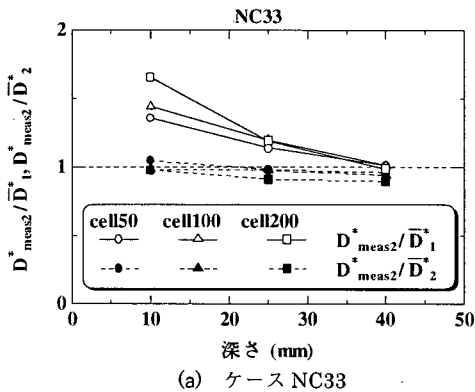


図-27 各深さにおけるD*の評価値と入力D*の平均値との比

図-25(a)~(f)に各測定点(L=10, 25, 40mm)におけるブレイクスルーカーブの比較を示す。図中 cell150, cell1100, cell1200 の数字は付与するセル圧を示している。セル圧が大きくなるほど均一供試体

と不均一供試体から得られる曲線の形状の差が大きくなり、その傾向は圧密圧力の小さなケース NC33で顕著となる。各深さにおける均一、不均一供試体のブレイクスルーカーブから算出した分子拡散係数

(D_{meas1}^* , D_{meas2}^*)を全層の入力分子拡散係数の平均値 \bar{D}_1^* と共に図-26(a), (b)に示す。不均一供試体の分子拡散係数 D_{meas2}^* は、平均的な特性を持つ均一供試体の分子拡散係数 D_{meas1}^* より大きく、特に流入近傍でそれが顕著となっている。浅い部分では D_{meas1}^* も \bar{D}_1^* よりやや大きくなっているが、これは3.(1)で説明した通り l が小さい部分ではベクレ数(Sauty)が小さくなり近似解と厳密解で差が現われるためである。

図-26(a), (b)には不均一供試体の計測点より上流における入力分子拡散係数の平均値 \bar{D}_2^* も示しており、不均一供試体の D_{meas2}^* をこの \bar{D}_2^* 、並びに全層の平均値 \bar{D}_1^* で除したものを各深さに対してプロットしたものが図-27(a), (b)である。 $D_{\text{meas2}}^*/\bar{D}_1^*$ は浅い部分で1を大きく上回り、その傾向はセル圧が大きなものほど、また圧密圧力が小さなものほど顕著となっている。つまり、深さ方向の間隙比変化が顕著となるほど本研究で用いた方法によって評価される分子拡散係数と全層の平均値とは大きく異なる事になる。一方、 $D_{\text{meas2}}^*/\bar{D}_2^*$ を見ると、浅い部分で若干1を上回る傾向は見られるが、その差は最大でも7%程度であり、この比はほぼ1に近い。これより透水力により流下方向に間隙比が減少するような供試体内で計測されるブレイクスルーカーブは計測点より上流の平均的な特性に主として影響を受け、今回用いた手法により評価される分子拡散係数は計測点上流の平均的な値とほぼ一致していると考えられる。言いかえるとある計測点 l で得られた分子拡散係数は、その上流の平均的な間隙比に対応する分子拡散係数という事になる。これまでの議論からも分かるように計測点と流入端からの距離 l はできるだけ大きい事が望ましいが、試験に要する時間等の関係で l の値を大きく採れない場合は、この点を考慮して計測分子拡散係数と供試体の間隙比の関係を決める必要がある。尚、今回のカラム試験の結果の整理では間隙比の代表値としては全層の平均値を用いたが、測定点が上端から全層の約70~80%の位置であったため、図-26, 27からも分かるようにその付近では D_{meas2}^* と \bar{D}_1^* との差は最大でも表-6に示す通り、4%程度であり、図-18に示した大小関係に対しては殆ど無視できるものといえる。

(3) その他の要因の影響

a) 電導度計の寸法効果

本研究の試験で用いられた4極式電導度計は10mmの直径を持つものである。供試体の厚さが約50mmほどである事を考えると電導度計の大きさが流れの場を妨げ、濃度の上昇に何らかの影響を与えている事が予想される。また、正規化時間や分子拡散係数を求

める際に用いる流入端から電導度計までの距離 l は流入端から電導度計の中心までの距離としているが、電導度計の反応の中心と物理的な中心が一致していない可能性もある。従ってより厳密な計測のためには、電導度計に対して、間隙比、濃度、埋設方向、電解質溶液に対する暴露面積などを組み合わせた詳細なキャリブレーションを行う必要がある。しかし、図-18にも示した通り、今回得られたカオリン粘土中の分子拡散係数は既往の報告におけるものと良い対応を示している事からこれによる誤差は有意なものではないと考えた。

b) 吸着, 脱着の影響

2.(1)で述べたように、 Na^+ , Cl^- のカオリン土粒子に対する吸着量は極めて少量である。しかし、濃度0mol/Lにおいて大きな負の吸着量が見られる。これは、カオリン粘土粉末をイオン交換水で練り混ぜた際に、間隙水中にこれらのイオンが脱着している事を意味している。つまり、トレーサー溶液が流入する前の粘土供試体中にすでに Na^+ , Cl^- が存在しているという事である。このバックグラウンド濃度が電導度計の出力値に影響を及ぼす事が予想される。予備圧密終了後、イオン交換水によって透水圧密を行う事により間隙水中のこれらのイオンの一部は洗い流される。もし、この影響が大きいとカラム試験初期に測定濃度の低下が見られる事になるが、本試験ではこの低下はほとんど見られず、今回の結果の整理の際に行った様にカラム試験開始時の濃度計測値をバックグラウンド値とする事は妥当であったと言える。しかし、対象としている粘土によっては初期に間隙水中にトレーサーとして対象にしているイオンを多く含む事も考えられ、試験中の計測初期の濃度変動に注意する事に加えて、バッチ試験等による吸着, 脱着特性の確認を併せて行う事が望ましい。

5. 結論

間隙比、過圧密比が粘土内の電解質の汚染物質の移動に与える影響を調べるために、地盤材料にカオリン粘土、トレーサー溶液に塩化ナトリウム水溶液(0.05N)を用いたカラム試験を行った。その試験結果からGreenkornとBrighamの解法を用いて粘土中の分子拡散係数と間隙比、過圧密比の関係を明確にした。また、これらの方法で分子拡散係数を算出する際に必要な仮定と実際のカラム試験との差によって生じる誤差要因について着目し、誤差量を定量評価する事からカラム試験の試験精度について検討を行った。その結果、次のような結論を得た。

①本研究で使用したカオリン粘土の様に粘土の中では比較的、透水係数の高いもので、しかも約 100 という非常に高い動水勾配の下での流れにおいても、粘土中の流体力学的分散は、分子拡散にほぼ支配され、機械的分散は無視できる。そのため、粘土中の汚染物質の分子拡散係数を測定する際には、大きな動水勾配を付与し、試験時間を短縮できるカラム試験が有効である。

②粘土中の分子拡散係数は正規圧密、過圧密に関係なく、間隙比に大きく依存する。本試験の条件では、約 1.9~1.6 の間隙比の減少により、分子拡散係数は $6\sim 2\times 10^{-10}(\text{m}^2/\text{s})$ と約 1/3 になった。

③粘土に対するカラム試験を行う際には、膨潤による変形、間隙比の変化などを防ぐため、粘土に載荷した状態で透水を行う必要がある。そのため、供試体の流入、流出端側では多孔板により供試体を拘束している。流入端側では、この多孔板により供試体に流入するトレーサー溶液が攪乱され、測定される分子拡散係数の誤差要因となるが、測定位置が流入端から遠いほどこの誤差は小さくなる。本試験では、全流下距離の 70~80% の位置で測定を行ったため、上部多孔板による誤差は 3% 未満であった。

④粘土に対してカラム試験を行う際には、大きな動水勾配を付与する事により試験時間を短縮する事ができる。しかし、正規圧密供試体で比較の間隙比が大きい場合、透水圧密により流出端方向に向かって間隙比、透水係数、分子拡散係数の不均一性が生じる。この不均一性に起因し、カラム試験より得られるブレイクスルーカーブは均一供試体から得られるものとは異なり、Greenkorn²⁵⁾の方法等によって求まる分子拡散係数は流入端に近いほど供試体全層における分子拡散係数の平均値より大きくなる傾向がある。流出端に向かって間隙比が不均一に分布する供試体を用いたカラム試験では、流入端から距離 L の測定点におけるブレイクスルーカーブから求めた分子拡散係数は、その上流の間隙比に対応した分子拡散係数の平均値になっており、間隙比が大きく変化する供試体から間隙比と分子拡散係数の関係を求める場合、この事を考慮する必要がある。

記号一覧

- n : 間隙率
 τ : tortuosity (流路曲折度) 多孔質体の間隙率、間隙構造などに依存する量
 P_a : 空圧として供試体に付与されるセル圧 (kPa)
 P_b : 供試体に付与される最終的な鉛直圧力 (kPa)
 P_{bc} : 過圧密供試体を作成する際の先行圧密圧力 (kPa)
 NC: 正規圧密供試体のテストコード NC の後の数字が最終的な鉛直圧力を指す
 OC: 正規圧密供試体のテストコード OC の後の数字が最終的な鉛直圧力を指す
 V_{int} : 間隙内平均流速 (m/s) $V_{int} = \text{Darcy 流速}/n$ で定義される
 D^* : 多孔質体中の分子拡散係数 (m^2/s)
 D_{mech} : 機械的分散係数 (m^2/s)
 D_{hl} : 流体力学的分散係数 (m^2/s)
 D_d : 無限希釈溶液中の分子拡散係数 $D^* = \tau D_d$
 V/V_0 : 透過体積比 $nAV_{int}t/nAL = V_{int}t/L$ A; 断面積 V_{int} ; 間隙内平均流速 t ; 経過時間 L ; 流入端から電導度計までの距離
 流入端から電導度計位置までの間隙体積と経過時間 t において流入したトレーサー溶液によって置換された間隙体積の比 透過体積比が 1 になった時に、移流により移動するトレーサーの先端が電導度計の位置に到達した事になる
 G_{po} : 多孔板の影響を考慮した数値解析の計算結果より、多孔板ありのケースにおける正規化ブレイクスルーカーブの $V/V_0=1.0$ における勾配の 2 乗の逆数 (Greenkorn の方法で、 D_{hl} を算出する際に使用)
 G_{ppo} : 多孔板の影響を考慮した数値解析の計算結果より、多孔板なしのケースにおける正規化ブレイクスルーカーブの $V/V_0=1.0$ における勾配の 2 乗の逆数 (Greenkorn の方法で、 D_{hl} を算出する際に使用)
 V_p : 多孔板の影響を考慮した数値解析の結果より、多孔板ありのケースにおける濃度変化から決定した間隙内平均流速 各深さにおいて相対濃度が 0.5 となるまでに要した時間でその深さ (流入端から測定点までの距離) を除したもの
 V_{pp} : 多孔板の影響を考慮した数値解析の計算結果より、多孔板なしのケースにおける濃度変化から決定した間隙内平均流速 各深さにおいて濃度が 0.5 となるまでに要した時間でその深さ (流入端から測定点までの距離) を除したもの
 D^*_1 : 深さ方向に不均一と仮定した数値解析より、計算の際に代入した深さ方向に不均一な分子拡散係数の全層の平均値

$D_{z_2}^*$: 深さ方向に不均一と仮定した数値解析より, 計算の際に代入した深さ方向に不均一な分子拡散係数の各深さまでの平均値

D_{mea1}^* : 深さ方向に均一と仮定した数値解析の結果より, 各深さのブレイクスルーカーブから算出した分子拡散係数

D_{mea2}^* : 深さ方向に不均一と仮定した数値解析の結果より, 各深さのブレイクスルーカーブから算出した分子拡散係数

参考文献

- 1) 緒方信英, 小峯秀雄: ベントナイト-砂混合材料の透水性に関する一考察, 第 29 回土質工学研究発表会講演集 3 分冊の 1, pp. 1883-1884, 1994.
- 2) 五十嵐孝文, 水品知之, 今村聡, 末岡徹: ベントナイト・砂混合土の透水特性, 第 31 回地盤工学研究発表会講演集 2 分冊の 1, pp. 329-330, 1996.
- 3) 平和男, 深沢栄造, 田中俊行: 礫・砂・粘土混合土の透水係数の推定式の適用性, 第 33 回地盤工学研究発表会講演集, pp. 1903-1904, 1998.
- 4) Chapuis, R. P.: Sand-bentonite liners predicting permeability from laboratory tests, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 27, pp. 47-57, 1990.
- 5) Kenny, T. C., Van, W. A., VeenSwallow, M. A. and Sungalia, M. A.: Hydraulic conductivity of compacted bentonite - sand mixtures, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 29, pp. 364-374, 1992.
- 6) Alston, C., Daniel, D. E. and Devroy, D. J.: Design and construction of sand - bentonite liner for effluent treatment lagoon, Marathon, Ontario, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 34, pp. 841-852, 1997.
- 7) Williams, K. H.: Clay liner permeability evaluation and variation, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 10, pp. 1211-1225, October, 1985.
- 8) Day, S. R. and Daniel, D. E.: Hydraulic conductivity of two prototype clay liners, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 8, pp. 957-970, August, 1985.
- 9) Daniel, D. E.: Predicting hydraulic conductivity of clay liners, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 2, pp. 285-300, 1984.
- 10) Sivapullaiah, P. V., Sridharana, A. and Rao, A. S.: Effect of phosphate adsorption on the permeability of clays, Proc. of Int. Conf. on Environmental Geotechnics, Kamon(ed.), Rotterdam, pp. 597-602, 1996.
- 11) Quigley, R. M., Fernandez, F. and Rowe, R. K.: Clayey barrier assessment for impoundment of domestic waste leachate(southern Ontario) including clay-leachate compatibility by hydraulic conductivity testing, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 25, pp. 574-581, 1988.
- 12) 清水恵助: 最終処分場にみる技術と問題点 海洋(海岸埋立地), 土木学会誌, Vol. 85, pp. 15-18, March, 2000.
- 13) 嘉門雅史, 勝見武: 廃棄物処分場における地盤工学的諸問題, 第 44 回地盤工学シンポジウム, 平成 11 年度発表論文集, pp. 35-40, 1999.
- 14) 福井正美, 桂山幸典: 飽和多孔性媒質内における分子の拡散および分散現象に関する研究, 土木学会論文報告集, 第 246 号, pp. 73-82, 1976.
- 15) Rowe, R. K., Caers, C. J. and Barone, F.: Laboratory determination of diffusion and distribution coefficients of contaminants using undisturbed clayey soil, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 10, pp. 108-118, 1988.
- 16) Ozawa, K., Takemura, J. and Kusakabe, O.: An experimental study of effect of void ratio on contaminant transport in clay, Proc. of Intn. Symp. on Physical Modelling and Testing in Environmental Geotechnics, France, pp. 93-100, May, 2000.
- 17) Barone, F. S., Yanful, E. K., Quigley, R. M. and Rowe, R. K.: Effect of multiple contaminant migration on diffusion and adsorption of some domestic waste contaminants in a natural clayey soil, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 26, pp. 189-198, 1989.
- 18) Gillham, R. W., Robin, M. J., Dytynshyn, D. J. and Johnston, H. M.: Diffusion of non-reactive and reactive solutes through fine-grained barrier materials, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 21, pp. 541-550, 1984.
- 19) 寺島泰, 岩井重久, 井上頼輝, 福井正美: 放射性廃棄物固化体中の放射性核種の溶出に関する研究, 保険物理, Vol. 5, pp. 12-22, 1970.
- 20) Yanful, E. K. and Quigley, R. M.: Tritium, Oxygen-18, and deuterium diffusion at the Confederation Road landfill site, Sarnia, Ontario, Canada, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 27, pp. 271-275, 1990.
- 21) Crooks, V. E. and Quigley, R. M.: Saline leachate migration through clay: a comparative laboratory and field investigation, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 21, pp. 349-362, 1984.
- 22) Engelhard Exceptional Technology: Aluminum silicate pigments for coatings, inks, adhesives, and other industrial applications, 土屋カオリン工業(株), pp. 1-2, 2001.
- 23) 土の試験実習書編集委員会: 土の試験実習書, pp. 121-132, 地盤工学会, 1991.
- 24) Ogata, A. and Banks, R. B.: A solution of the differential equation of longitudinal dispersion in porous

- media, U. S. Geological Survey Professional paper 411-A. 1961.
- 25) Greenkorn, R. A. : *Flow phenomena in porous media, fundamentals and applications in petroleum, water and food protection, Energy, Power, and Environment*, Vol. 16, pp. 183-189, 1983.
- 26) Brigham, W. E. : Mixing equations in short laboratory columns, *Society of Petroleum Engineers Journal* 14, No. 15, pp. 91-99, 1974.
- 27) Sauty, J. P. : An analysis of hydrodispersive transfer in aquifers, *Water Resource Research*, No. 16, pp. 145- 158, 1980.
- 28) Shackelford, C. D. : Diffusion of contaminants through waste containment barriers, *Transportation Research Record* 1219, pp. 169-182, 1988.
- 29) Perkins, T. K. and Johnston, O. C. : A review of diffusion and dispersion in porous media, *Society of Petroleum Engineers Journal* 3, pp. 70-84, 1963.
- 30) James, R. V. and Rubin, J. : Accounting for apparatus -induced dispersion in analyses of miscible displacement experiments, *Water Resource Research*, Vol. 8, No. 3, pp. 717-721, June, 1972.
- 31) Fox, P. J. : Analysis of hydraulic gradient effects for laboratory hydraulic conductivity testing, *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 19, No. 2, pp181-190, 1996.

(2001. 3. 30 受付)

MEASUREMENTS OF DIFFUSION COEFFICIENTS OF CLAY WITH COLUMN TRACER TESTS

Kazuki OZAWA, Jiro TAKEMURA and Osamu KUSAKABE

In this study, column tests were carried out to measure the coefficients of molecular diffusion of high plastic kaolin clay with different void ratios and numerical analyses were conducted to estimate the accuracy of the measured dispersion coefficients. The result of column tests showed that hydrodynamic dispersion in the clay was mainly caused by the molecular diffusion and the trend between the void ratio and the dispersion coefficients was similar to that between void ratio and hydraulic conductivity. From the numerical analyses, it was found that the precision of measurement of dispersion coefficients depended on the vertical distributions of physical properties of clay sample and the accuracy of the initial and boundary condition in column tests.