

難透過性岩石を対象とした透水・透気試験システムの 開発およびその適用

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF THE WATER/GAS PERMEABILITY TEST SYSTEM FOR LOW PERMEABLE ROCK

江崎哲郎*・三谷泰浩**・笹田俊治***・藤吉秀彰****・秦 将之*****

Tetsuro ESAKI, Yasuhiro MITANI, Toshiharu SASADA, Hideaki FUJIYOSHI, Masayuki SHIN

Recently, underground facilities are increasing. In order to ensure the isolation and sealing characteristic of surrounding rock, it is very important to evaluate the transmissivity of low permeable rock accurately.

In this study, a new system of the water/gas permeability test has been developed. The proposed optimum approach has been cross checked with the constant flow and constant pressure methods. According to the testing results, it is found that setting an initial gas pressure is desirable. It is about 2.0-10 kPa in this research. Furthermore, the transient pulse test is carried out either and the deviatoric stress influence is investigated. As a result, the hydraulic conductivity fell down to about one-tenth with increasing the deviatoric stress when confining pressure is 1.0 MPa.

Key Words: low permeable rock, water/gas permeability test, flow pump method, transient pulse method

1. はじめに

近年、高レベル放射性廃棄物の地層処分や CO₂ の地中貯留など、岩盤の隔離性・密閉性を活用する新しい地下深部開発が数多く計画されている。このような施設では隔離の性能を評価するために、従来は工学上不透水とされてきた岩盤の流体移動特性を高精度に測定する技術の確立が不可欠である。近年、難透過性材料を対象としたこのような研究開発が盛んに行われ、特に室内透水試験に関しては難透過性を対象とした様々な試験方法が提案されている^{1), 2)}。

現在、透水係数が 10^{-7} cm/s 以下の難透過性岩石の透過特性の評価方法には、透水試験法ではトランジェントパルス法やフローポンプ法、また透気試験法では圧力制御法と流量制御法などが適していると考えられる。透水試験としてのトランジェントパルス法は試験を短時間で高精度に行えるが、試験体端部に高い動水勾配が発生するため未固結材料への適用性は低いこと、フローポンプ法は難透過性岩石のように透水係数が小さい場合は定常状態になるまでに時間がかかるが、これについては理論的なアプローチにより、定常状態に至るまでの実験を行わずとも評価する手法が開発されている。また、低動水勾配で試験が行えるため比較的確切な透過特性を評価でき

-
- | | | | | |
|-------|------|------|-------------------|-----|
| * | 正会員 | 工博 | 九州大学大学院工学研究院 | 教授 |
| ** | 正会員 | 博(工) | 九州大学大学院工学研究院 | 助教授 |
| *** | 正会員 | | 九州電力(株)土木部原子力グループ | |
| **** | 非会員 | | パシフィックコンサルタンツ(株) | |
| ***** | 学生会員 | | 九州大学大学院工学府 | |

ることなどが指摘されている³⁾。

一方、透気試験では、気体の粘性が液体と比べ2オーダー以上小さいため高精度に透気特性を評価するには気体の温度を正確に制御・計測する必要がある。流量制御法は、計測項目である差圧の計測は高精度に行えるが、定常状態に達するまでに注入気体の圧力が漸次増加するため、体積変化によって気体の温度が変化する可能性があり、温度の正確な計測が必要不可欠となる。一方で、圧力制御法では、試験は試験開始時から一定圧力のガス圧が加えられるために体積変化による温度変化は小さいが、ガス圧が大きいと試験体内部で圧力低下による気体温度の減少により誤差が大きくなるという特徴が挙げられる⁴⁾。

このように、難透過性岩石の透過特性を評価する技術は未だ不十分であり、多くの検討が必要である。また、より迅速な試験が可能である室内透気試験に関しても、難透過性を対象とした試験方法の確立が望まれる。

本研究では、偏差応力や高い拘束圧などの地下深部の地圧状態を再現した上で、難透過性岩石の透水・透気試験システムを新たに開発する。そして難透過性材料の透気試験に関して、最適な試験条件について検討するために、様々な注入圧条件の下、流量制御法と圧力制御法の2つの試験を実施する。そして、注入圧が透気特性に及ぼす影響を明らかにし、両試験法の適用範囲について検討を行う。さらに、開発した試験システムを用いて偏差応力が透過特性に及ぼす影響についても検討する。

2. 透水・透気試験システム

2. 1 新しい透水・透気試験システムの特徴

開発した試験システムは、張ら⁵⁾が開発したものに更にいくつかの改良を加えたものである。張らの試験システムでは等方圧縮応力状態で透水・透気試験が実施でき、 10^{-7} cm/s 以下の透水係数について計測が可能であるが、幾つか改良すべき点が残されていた。第一の問題点は、透水・透気試験時における温度の正確な計測と制御である。具体的には試験中の温度が正確に制御・計測できなければ、以下の点が問題となる。

- ・トランジェントパルス法、フローポンプ法において容器と水との膨張率および圧縮率が異なるために温度変化により容器中の水圧が変動する。そのため、計測される差圧に誤差が生じる。
- ・透水試験を行う場合、試験に用いる液体（水）の粘性は気体とくらべ大きいため、わずかな温度変化が正確な透水特性計測に影響を及ぼす。

第二に、従来の試験システムの高度化のために以下の点について改良する。

- ・透過特性が拘束応力に依存することはよく知られており、高精度な計測を行うには、原位置の応力条件を再現できるように試験を行うことが望ましい。そこで任意の偏差応力下でも試験を行えるようにする。
- ・非定常状態における流体移動は、透水係数だけではなく貯留係数にも支配される。貯留係数は岩石の弾性係数などに支配的である⁶⁾。応力の変化にともなう試験時の変形量を把握することは重要であり、試験体に発生するひずみを正確に測定できるようにする。

上記のような問題点、改良点を解決するために拘束圧発生装置、三軸試験容器、計測システム、さらに、正確な温度の計測・制御のために装置および恒温室の改良を行う。

2. 2 試験装置の概要

本研究で開発した透水・透気試験システムの概略を Fig. 1 に示す。以下にその特徴を示す。

- (1) 試験体の拘束圧力は対象とする深度に応じて様々である。例えば高レベル放射性廃棄物処分施設は、地下500～1,000 m程度に建設が計画されている。圧力容器は大深度地下における高圧の拘束圧まで再現可能にするため設計耐用圧は100 MPaとする。例えば、岩石の単位体積重量を25 kPa/mとすると100 MPaは、地下4,000 mの深度に相当する。
- (2) 拘束圧発生装置および流量制御法、フローポンプ法、トランジェントパルス法における試験体への流体の

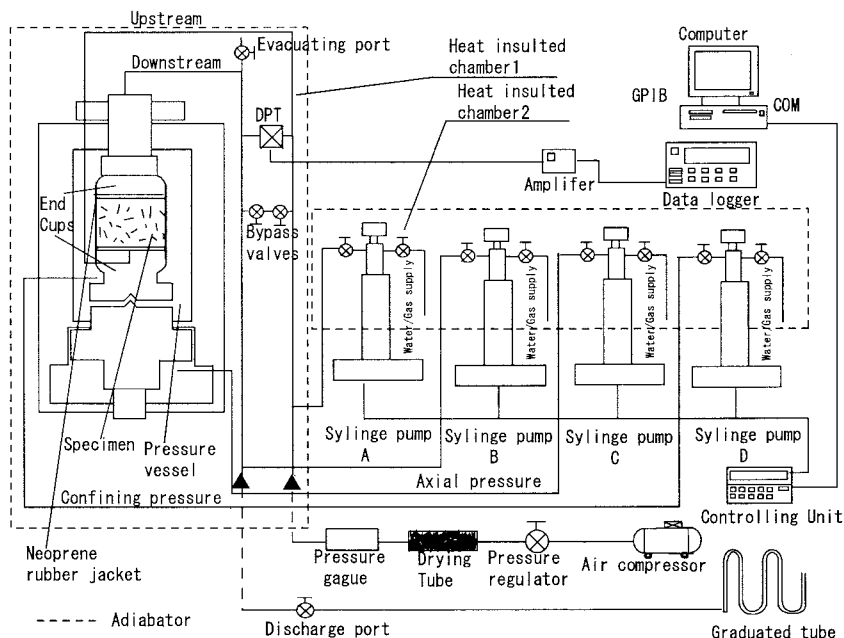


Fig. 1 Schematics view of test system.

注入にはシリンジポンプを用いる。シリンジポンプは 103 cm^3 の容量を持ち、注入流体を定圧および定流量で制御できる。制御精度として定圧の場合、 $69 \text{ kPa} \sim 69 \text{ MPa}$ までの圧力を 1.0 psi ($1.0 \text{ psi} = 6.9 \text{ kPa}$) の分解能で与えることができ、定流量では $1.7 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{s} \sim 0.83 \text{ cm}^3/\text{s}$ の流量を $\pm 3 \%$ の精度で送り出せる。軸圧は、Fig. 2 のシリンジポンプ C からシリコンオイルを注入し、三軸試験容器の底部のピストンを用いて載荷する。側圧は三軸試験容器内にシリンジポンプ D を用いてシリコンオイルを注入する。また透水・透気試験を行うための流体の注入は、Fig. 2 中の上流側と下流側のシリンジポンプ A, B をそれぞれ用いる。

- (3) 圧力制御法での注入圧力の制御は、コンプレッサーを用いて、注入圧を $0.98 \sim 980 \text{ kPa}$ の範囲内で制御する。試験体の上下端の圧力差を差圧計 (Validyne DP15, ISCO 社製) で計測しながら制御弁で調節する。この差圧計は非常に高い線形性を持ち、内部のダイヤフラムを交換することで $\pm 0.55 \sim \pm 22063 \text{ kPa}$ の広い圧力の範囲をフルスケールの $\pm 0.25 \%$ の精度で計測できる。さらに流量制御法やトランジェントパルス法の計測項目である差圧の計測にもこの差圧計を用いる。

- (4) 透気試験に用いるガス流出量の計測チューブの目盛りは、高精度シリンジポンプを用いた較正試験を行って定める。その分解能は $4.3 \times 10^{-3} \text{ cm}^3$ (1 cm^3 当たりの読みは 12 cm) である。チューブは長期間使用するとマノメータオイルの色素が沈着したり、劣化して計測精度が落ちる可能性があるため、計測目盛りやチューブの位置が使用限界に達したら交換する。

- (5) 透気試験では、注入するガスの湿気を取り除くために、シリカゲルを用いたガス乾燥装置 (Fig. 1 中の Drying tube) を通過させたガスを

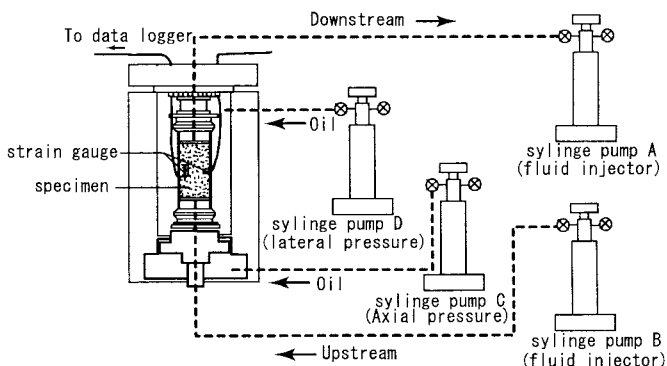


Fig. 2 Part of syringe pump in test system.

使用する。

- (6) 高圧力条件で試験を実施するために配管やバルブは高圧用のステンレス製のものをを用いる。また流体などの漏れを防ぐために配管の接続はできるだけ溶接する。流入・流出ガス、水および試験装置周辺の温度の監視センサーには ± 0.10 °Cの精度で計測できる白金測温抵抗体を用い、試験体の上流側・下流側にそれぞれ設置する。
- (7) 圧力、温度およびシリンジポンプの流量の出力は、データロガーを経由し GPIB インターフェイスによりコンピュータに転送される。この計測システムにより必要な計測物理量を任意の時間間隔で同時に記録できる。
- (8) 試験時の試験体の変形を計測する際には、試験体の側面に直角 90°方向でそれぞれ2方向にひずみゲージを貼付し、ペDESTALとともにゴムスリーブで覆う。ひずみゲージのリード線を容器外に出すため、ゴムスリーブの2箇所穴を開け、その上から硬化剤(ハマタイト Y-500-I, 横浜ゴム社製)を塗って穴を塞ぐ。また、リード線は銅線を介して計測・記録装置に接続される。
- (9) 試験体のセッティングの際には試験に用いる流体や側圧用の油が漏洩しないようにゴムスリーブと上下のペDESTALを針金で固定し、さらにゴムスリーブの接点、ひずみゲージ用に開けた穴および試験体と上流・下流側をつなぐボルトなど漏洩が懸念される箇所の上から厚さ 3.0~5.0 mm 程度のシリコンを塗布し、シリコンが完全に乾燥するまで待ってから、試験体を三軸試験容器内に設置する。
- (10) 試験室の温度変化の原因には、外気温の変化によるもの、計測機器等の発生する熱によるものがある。そこで、温度変化に対応し高精度に、注入する流体の温度を計測・記録するため全ての装置を恒温室内に設置し、三軸試験容器、シリンジポンプ(操作部以外)は断熱材で覆い、壁や床にも断熱材を用いる。

3. 最適な透気試験方法の提案

3. 1 試験体

実験には直径 50 mm 高さ 25 mm の円柱形の白浜砂岩を自然乾燥状態で用いる。白浜砂岩は中硬岩に分類される。この砂岩は今から約 1,400 万年前の新第三紀・中新世に堆積した田辺層群の白浜層に属する均質な中粒から粗粒の砂岩であり平均粒径は 0.10 mm, その構造は粒子が網目状に結合している⁷⁾。また物理特性としては、空隙率が約 13 %で、強度破壊点以前での非弾性ひずみが 15×10^{-4} と他の砂岩に比べて格段に大きい。また一軸圧縮強度は約 60 MPa である。

3. 2 実験条件および手順

開発した試験システムを用いて流量制御法および圧力制御法による透気試験を実施する。

流量制御法ではシリンジポンプを用いて、試験体の一端に一定の流量のガスを流す。また他端に接続するシリンジポンプは差圧を正確に計測するため、常時、大気解放状態に保つ。その後、差圧を差圧計によって計測し理論式(1)から固有浸透率を算出する。

圧力制御法ではエアコンプレッサを用い試験体の一端に一定の圧力のガスを注入する。また他端はガス流出量の計測チューブに接続し、ガスの流出量を、ガス流出量計測チューブ内のマノメータオイルの動きから読みとり、試験体内のガスの透気量を測定する。そして、計測した透気量から理論式(2)を用いて固有浸透率を算出する。

$$K = \frac{2Q_g \mu_g p_i}{A} \frac{l}{p_0^2 - p_i^2} \quad (1)$$

$$K = \frac{2Q_i \mu_g p_i}{A} \frac{l}{p_0^2 - p_i^2} \quad Q_i = Q_g \quad (2)$$

ここで z : ガス注入側の試験体端面からの軸方向の距離(m) μ_g : ガスの粘度(kg/m・s) K : 透気係数(m^2) Q_g :

大気圧状態における流出量(m^3/s) A : 試験体の断面積(m^2) l : 試験体の長さ(m) p_o, p_i : $z=0$ (ガス流入位置)および $z=l$ (ガス流出位置)における絶対圧力($kg/m^2 \cdot s^2$) Q_g : 気体注入量(m^3/s)である。

さらに実験では、注入圧力が岩石の透過特性に及ぼす影響を明らかにするために、注入圧を段階的に変化させて流量制御法と圧力制御法を実施する。なお、流量制御法については、注入気体の流量の制御により注入圧を変化させる。試験時間が長時間にならなければ流量制御法では高精度な結果が得られるため、流量制御法で得られた値を基準として、その適用範囲を確認する。流量制御法では注入圧を 0.10 kPa から 7.6 kPa まで 8 段階で設定し、圧力制御法では注入圧を 0.60 kPa から 450 kPa まで 14 段階に設定して実験を行う。拘束圧は、いずれの試験においても 3.0 MPa とする。

また、流量制御法については、大気圧をゼロとしてシリンジポンプによって加えられる圧力の差圧を計測する。そのため、上流側および下流側のガスは、比重や密度などの物理的性質がより同じものを用いるのが望ましい。正確な難透過性岩石の透気特性を評価するには透気試験に用いるガスの種類の選定も重要となるが、今回は、特にガスの種類には考慮せず、空気を用いて試験を行う。また圧力制御法においても、今回は流量制御法とのクロスチェックを行うため、条件を同等にするために空気を用いる。

3. 3 注入圧が固有浸透率に及ぼす影響

流量制御法から得られた注入圧 0.12, 0.24, 0.35, 0.60, 1.2, 2.4, 5.0, 7.7 kPa における固有浸透率の値と圧力制御法で計測された固有浸透率の値の計測結果を Fig. 3 に示す。2つの実験とも、これまで計測が困難であった難透過性の領域の固有浸透率($10^{-16} m^2$ のオーダー)を求めることができた。

流量制御法において、同一とみなせる試験体を用いている限り、固有浸透率は一定の値をとるはずである。しかし今回得られた固有浸透率の値は、注入圧が増加するとともに減少する傾向がみられた。試験中は温度変化が ± 0.10 °C 以内であったために、気体の粘性の影響はほとんどないと考えられ、この時、注入圧と流量の関係は比例関係になかった。この結果は、注入圧が上昇すると試験体内の気体の流れが層流から乱流に遷移していることを示している。したがって、流量が増えるにつれて固有浸透率が減少するのは、乱流の影響が顕著になるために層流を想定したダルシー則に従わなくなっているのが原因と考えられる。また、流量が小さい場合(注入圧が小さい場合)は、固有浸透率はほぼ一定の値をとっており、層流状態であると判断できる。ところが、差圧の計測は差圧計で行うため、注入圧があまりに低いと、差圧計の分解能の許容範囲を超えてしまった可能性がある。本実験で用いた差圧計は、市販品の中では最も分解能が高いが、1.0 kPa 以下の差圧を高精度に計測するには十分な精度があるとはいえず、1.0 kPa 以下の注入圧では 0.0025 Pa の差で、数%程度の固有浸透率の変化が生じる。

圧力制御法においては、目視でマノメータオイルの動きを読むために多少のばらつきが生じたが、一様に注入圧が増加すれば固有浸透率は単調に減少する傾向を示した。固有浸透率は同一の試験体であり注入気体が層流であれば一定の値となるはずである。しかし試験中の温度変化が ± 0.10 °C 以内のため、気体の粘性の影響が固有浸透率に現れているとは考えにくい。また、この時、注入圧と流量の関係は完全な比例関係になく、これも流量制御法の時と同様に、試験体内の気体の流れが乱流状態であるため、ダルシー則に従わなくなっているのが原因と考えられる。また、今回は低い注入圧条件の場合でも固有浸透率は減少傾向にあった。これは、気体は液体より粘性が 2 オーダー程低いために、層流状態であれば、粒子の表面に付着せず固有浸

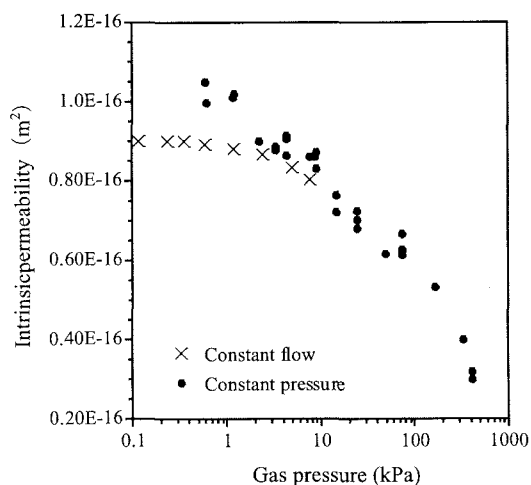


Fig. 3 Intrinsic permeability at various gas pressure.

透率が実際よりも高く評価される「すべり」といわれる現象とも考えられる⁸⁾。そこで、「すべり」の影響が顕著であると思われる、注入圧が 2.0 kPa 付近までの、得られた幾つかの固有浸透率について、Klinkenberg effect plot により真の固有浸透率を求める⁹⁾。その結果、真の固有浸透率は $7.7 \times 10^{-17} \sim 9.9 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ になり、実際に計測された固有浸透率は「すべり」の影響により最大で約 20 % 程度、固有浸透率を過大に見積もっていたことになる。

以上の結果を踏まえて、圧力制御法、流量制御法ともに層流状態であるか乱流状態であるかの定量的な判定は非常に困難であるが、実験では、固有浸透率は $0.30 \times 10^{-16} \sim 0.83 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ (透水係数に換算すると $2.6 \times 10^{-8} \sim 7.1 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$) まで計測ができた。よって難透過岩石の透過特性を評価するには有効な試験法であることが確認された。

3. 4 流量制御法と圧力制御法の適用範囲

流量制御法は、気体温度を正確に計測できれば高精度な計測結果が得られる。しかし注入量を大きくすればする程、定常に達するまでに長時間を要するため、その間の気体や環境温度の変化を抑えるのが困難である。また、圧力制御法は目視で計測を行うために精度はやや劣るが、試験時間は流量制御法に比べて大幅に短縮できるので、環境温度変化を小さくできる。さらに気体圧力をできるだけ小さくすれば気体の温度変化も抑えることが可能である。

これらのことより、難透過性材料の透過特性を評価する上で、2つの試験法の特徴を生かした適切な透気試験を選択することが重要と考えられる。そこで得られた計測結果から、両試験法の適用範囲について整理すると Fig. 3 より、計測項目である差圧の計測は差圧計で行うが注入圧が 1.0 kPa 以下になると、差圧計の分解能を超えてしまう可能性があり、十分な精度があるとはいえない。また注入圧が 10 kPa 以上になると乱流の影響が卓越し、透過特性を過小評価してしまう。そこで今回使用した白浜砂岩を用いて適切に透気試験を実施するために、注入圧は、差圧計の分解能の精度が保証される範囲にあつて、しかも乱流の影響も少ないと見られる、約 2.0～10 kPa 付近の範囲内で設定して行うのが望ましいといえる。

4. 偏差応力が透過特性に及ぼす影響について

軸差応力の影響についてより詳細に検討するため、高さの大きい試験体を用いる。今回は、透水試験法として温度の影響が少なく、比較的短時間で試験が実施できるトランジェントパルス法を選定する。

岩石の透過特性は空隙率に大きな影響を受けるため、実験中の試験体の変形性を計測することは有効である。そこで、ここでは偏差応力による影響として発生するひずみを計測し、透水挙動とともに試験体の変形挙動を同時に把握する。

4. 1 試験体

本実験では、比較的均質で、き裂の少ない軟岩である来待砂岩を用いる。来待砂岩の寸法は直径 50 mm 高さ 100 mm であり、今から約 1400 万年前の新第三紀・中新世に堆積した出雲層群に属する、中～粗粒の凝灰岩質砂岩である¹⁰⁾。また、空隙率が約 20 % と比較的大きい岩石である。一軸圧縮強度は約 35 MPa である。なお、試験体にはひずみ計測のために、ひずみゲージを試験体の側面に、直角 90° 方向でそれぞれ 2 箇所貼り付ける。

4. 2 試験条件および手順

トランジェントパルス法を実施する前に、まず、シリンジポンプ内を水で飽和させる。次に、真空ポンプを用いて試験体内およびすべての配管を水で完全に飽和させる。次に飽和した試験体内の間隙水圧を上昇させるため、上下流側を分断しているバルブをすべて開放した後で、上流側のシリンジポンプ A (Fig. 2) から水を一定流量で流すことで試験体内の間隙水圧を上昇させる。その後、配管内に組み込まれているパルス圧载荷用バルブを開閉することで、瞬間的にパルス圧を加え、差圧を計測する。実験は差圧の低下が一定値に収束した時点で終了する。

今回は、軸差応力が透過特性に及ぼす影響を明らかにするため、拘束圧はそれぞれ 1, 10, 20 MPa に設定し、軸差応力は段階的に 0 MPa～30 MPa まで 5.0 MPa ずつ载荷する。また、透水試験開始時の間隙水圧は 0.50 MPa に固定する。この時、試験体に生じる動水勾配が大きすぎると試験体を損傷する可能性があるため、ASTM 基準 (D5048) ¹¹⁾より最大動水勾配が 4.0～8.0 程度になるように調節する。

さらに、間隙水圧の加圧手順としては、バルブをすべて閉じた状態で、シリンジポンプを用い、ポンプの限界圧力を所定の間隙水圧に設定し、100～1000 $\mu\text{L}/\text{min}$ 程度の一定の微流量で間隙水圧を漸次増加させる。その後、ポンプの制御モードを 50 kPa の定圧に切り替え、加圧過程における流量の経時的な変化を監視し、流量がほぼゼロになるまで加圧を継続する。この時ポンプ流量が大きすぎると試験体内の粒子を破壊してしまい、正確に透水係数が評価できなくなるので 1000 $\mu\text{L}/\text{min}$ 以上の流量は与えないようにする。このような間隙水圧の加圧方法により、試験体中の水圧の急激な変化を防ぎ、試験体をできるだけ乱さない状態での透水試験が可能になる。

4. 3 実験結果および考察

拘束圧が 1.0 MPa の時の透水係数の計測結果を Fig. 4 に示す。また、この時の体積ひずみの計測結果を Fig. 5 に示す。計測結果より試験体は軸差応力が約 5.0 MPa 程までわずかに体積収縮を生じている。この時の体積ひずみは静水圧状態の時から 4.5×10^{-4} % まで減少した。その後、軸差応力の増加とともに試験体は体積膨張を起こしていることがわかる。また、軸差応力が 30 MPa の時の体積ひずみは、拘束圧が 10 MPa の静水圧状態から 2.8×10^{-2} % 増加している。さらに透水係数は、軸差応力の増加にしたがって減少する傾向にあり 1 オーダー近く減少している。

今回、透水係数が軸差応力の増加とともに減少傾向を示したのは、軸差応力が漸次载荷され変形が進んだために、透水性に関与する空隙が閉塞されたことが原因と考えられるが、このメカニズムの解明については今後の課題としたい。

また、この後、体積膨張を生じた試験体を用いて拘束圧を 10 MPa および 20 MPa に設定し、トランジェントパルス法を実施した。その結果を Fig. 6 に示すが、透水係数にあまり変化はなくほぼ一定の値をとった。しかし、透水係数の変化が微小にもかかわらず拘束圧が 10 MPa の時において体積ひずみは漸次増加し、試験体は体積膨張を生じた。拘束圧が 20 MPa の時については縦ひずみが計測できなかったが、これらの現象は、体積膨張を生じた際に、ひずみゲージが破損していた可能性があり、ひずみの計測方法については更なる改良が必要である。

5. まとめ

本研究では、難透過性岩石を対象とした室内透水・透水試験システムの開発を目的に、地下深部を想定した拘束圧および偏差応力状態で透水・透水試験が実施

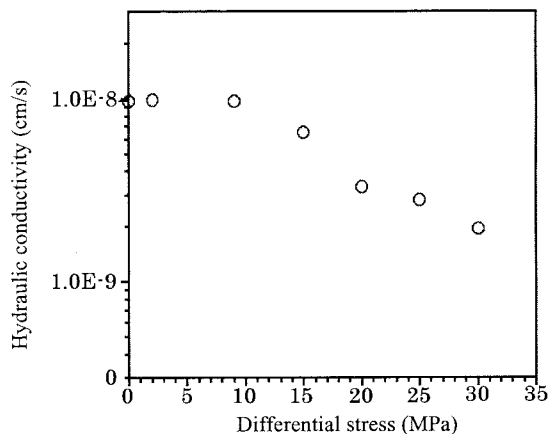


Fig.4 Permeability at differential stress.

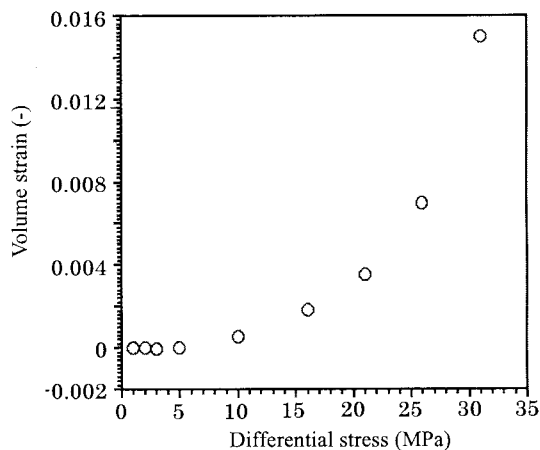


Fig.5 Change of Volume strain with differential stress.

できる試験システムを開発した。そして、開発した本試験システムを用いて、白浜砂岩を対象とした流量制御法と圧力制御法とのクロスチェックを行い、透気試験における注入圧の検討を行った。

その結果、 10^{-8} cm/s オーダーの透水係数を高精度に計測することができたが、難透過性岩石の透過特性を精度よく評価するには、差圧計の計測精度の限界や注入圧の増加とともに乱流状態に至ることなどを考慮し、試験条件を設定することが不可欠であることが明らかとなった。なお、今回の透気試験に関しては、注入圧を 2.0～10 kPa 付近に設定するのが望ましいことが明らかになった。

また、同試験システムを用いて、偏差応力下で、トランジェントパルス法による透水試験を実施し、偏差応力が透過特性に及ぼす影響について検討した。

その結果、拘束圧が 1.0 MPa の時には、試験体は、軸差応力載荷直後に体積膨張が生じ、この時の透水係数は、常に減少傾向を示した。これは軸差応力の載荷により、せん断方向に透水性に関与する空隙が閉塞されたためだと考えられるが、このメカニズムの解明については、今後の課題としたい。

謝辞

本論文を作成するにあたり、独立行政法人産業技術研究所、張銘氏、竹田幹郎氏に御指導、御協力を頂きました。この場を借りて謝意を表す。

参考文献

- 1) 張 銘, 竹田幹郎, 江崎哲郎, 高橋学, 遠藤秀典: 拘束圧および異方性が岩石の透水・透気特性に及ぼす影響, 資源と素材, Vol.117, No.12, pp.941-946, 2001.
- 2) 竹田幹郎, 張 銘, 江崎哲郎, 高橋学, 三谷泰浩: 岩石の透気特性および水理学的異方性に関する実験的研究, 応用地質, 第 41 巻, 第 4 号, pp.210-217, 2000.
- 3) 張 銘, 高橋 学, 江崎 哲郎: フローポンプ透水試験法の新理論及び適用について, 第 10 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.719-724, 1998.
- 4) Eischens, G. *et al.*: Proposed Standard Test Method for measurement of Pneumatic Permeability of practically Saturated Porous Materials by Flowing Air, Geotechnical Testing Journal, Vol. 19, No.2, pp.232-238, 1996.
- 5) 張 銘, 高橋学, 江崎哲郎, 遠藤秀典: 透水性岩盤材料を対象とした高精度汎用室内透水試験システムの開発, 応用地質, 第 43 巻, 第 2 号, pp.83-91, 2002.
- 6) 徳永明祥: 貯留係数に関する一、二の議論, 応用地質, 第 39 巻, 第 5 号, pp.475-479, 1998.
- 7) 市原実, 市川浩一郎, 中沢圭二: 日本の地質 6 近畿地方, 共立出版 (株), pp.127, 1987.
- 8) Bloomfield, J.P. and Williams, A. T.: An Empirical Liquid Permeability-Gas Permeability Correlation for Use in Aquifer Properties Studies, Quarterly journal of engineering geology, Vol.28, pp.143-150, 1995.
- 9) Amyx *et al.*: Petroleum Reservoir Engineering, McGRAW-HILL COMPANY, INC., pp.91-93, 1960.
- 10) 大久保雅弘, 村上允英, 猪木幸雄: 日本の地質 7 中国地方, 共立出版 (株), pp.203, 1987.
- 11) ASTM2000, Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter(D5048), Annual Book of ASTM Standards, Vol.04.08, pp.985-992, 2000.

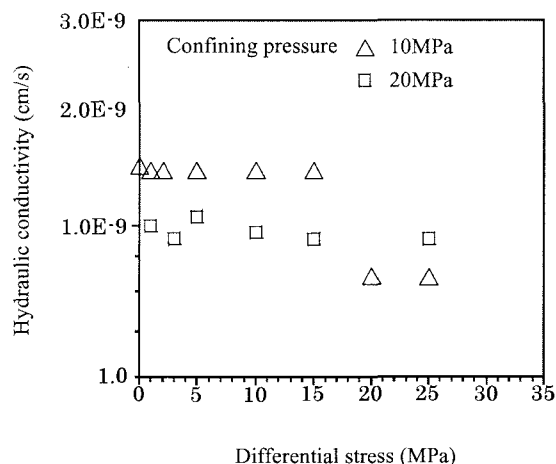


Fig. 6 Permeability at differential stress.