偏差応力下における難透過性岩石の透水特性に関する研究

九州大学工学部　学生会員 ○山下　健一　九州大学大学院　正会員　江崎　哲郎
九州大学大学院　正会員　三谷　泰浩　九州大学大学院　学生会員　秦　将之

１．はじめに

近年，高レベル放射性廃棄物の地層処分や CO_2 の地中貯留などに代表される地下深部の開発・利用が数多く計画されている．これらは，深部岩盤の難透過性による隔離性・密閉性を活用するものである．しかしながら，このような隔離性・密閉性を保持できる難透過性岩石は比較的深部に存在し，そのような場所では透過性に対する応力の影響を無視することができなくなると考えられる．したがって，地下深部の状況を再現しながら，難透過性岩石の透水特性を定量的に評価することが必要となるが，これらを対象とする技術は未だ確立されていない．

本研究では，高い拘束圧や偏差応力条件下で地下深部の環境を再現し，難透過性岩石の高精度な透水特性評価行うため，トランジェントパルス法を用いて偏差応力下での難透過性岩石の透水試験を行う．

２．試験装置

使用した試験装置の概略図を **Fig.1** に示す．

試験装置は一台で透水試験では定水位法，変水位法，トランジェントパルス法，フローポンプ法，また透気試験では圧力制御法，流量制御法を実施できる．

圧力容器は地下深部の高い拘束圧を再現できるよう設計耐用圧は 100MPa である．

試験時の拘束圧発生装置として，シリンジポンプ C，D を用いる．軸圧はシリンジポンプ C により試験容器底部に設置してあるピストンを動かして載荷する．側圧はシリンジポンプ D を用いて油圧により載荷する．透水試験の注入圧制御にはシリンジポンプ A，B を，透気試験の注入圧制御にはコンプレッサーをそれぞれ用いて，注入圧を任意に制御することが可能である．

全ての装置を恒温室内に設置し，静水圧型三軸容器，シリンジポンプを断熱材で覆い，床・壁にも断熱材を用いることで，試験室内の温度変化の原因として考えられる外気温の変化や計測機器等の発生熱による影響を最小限に抑えることができる．また，流入・流出水およびガスの温度と環境温度の監視センサーには白金測温抵抗体を用い，±0.1℃の精度で計測・管理する．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で GPIB インターフェイスを経由して同一コンピュータに転送される．この計測システムを用いて必要な計測物理量を任意の時間間隔で記録できる．

３．予備試験による透水試験条件の検討

本研究では試験体に来待砂岩(円柱φ：50mm，Ｌ：100mm)を用いてトランジェントパルス法による透水試験を行う．透水試験を行う前に，使用する試験体である来待砂岩の力学･物理特性を事前に求める．具体的には，一軸圧縮試験および三軸圧縮試験を行い，試験時の載荷条件を設定する．特に三軸圧縮試験は，市販の岩石三軸圧縮試験装置と今回の透水試験で使用する試験装置の２つの異なる装置を用いて比較検討を行う．

来待砂岩の物理特性として，絶乾時の単位体積重量 2.0g/cm^3，間隙率が 26%と比較的ポーラスな岩石であることが確認された．また，一軸圧縮強度は 46MPa であった．

三軸圧縮試験の軸圧の載荷方法としては，市販の岩石三軸圧縮試験装置では変位計による変位制御，透水試験装置では応力制御により行う．両者の偏差応力とひずみの関係を **Fig.2** に示す．

図に示すように，偏差応力が増加するに従い，両者のひずみの差が大きくなっている．この原因としては，透水試験装置を用いた試験では応力制御を採用しているこ

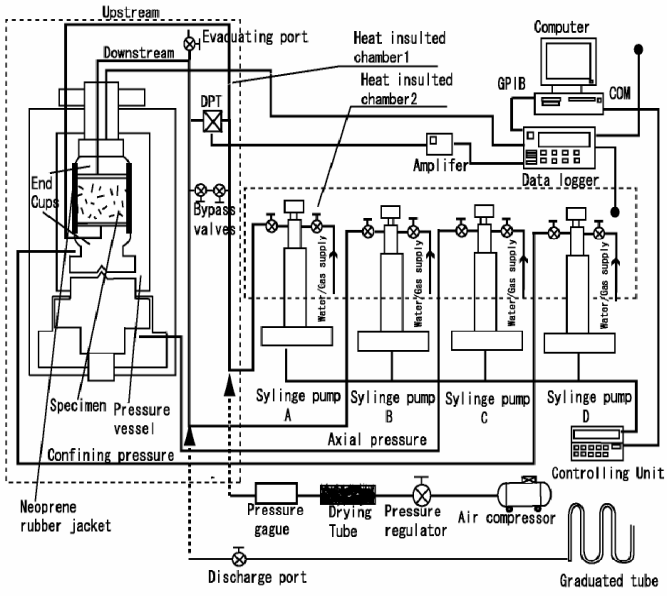

Fig.1　Schematic view of test system.

と，また，岩石三軸圧縮試験装置と比べて載荷速度が遅いことから，クリープによる影響が出ているものと考えられる．

また，ひずみの差が比較的小さい範囲では線形的な挙動であり，弾性領域内であると判断できる．

従って，以下の透水試験は，クリープの影響によるひずみの差が比較的小さく，弾性領域内と確認できる6MPa 以下の偏差応力で行う．

４．偏差応力が透水特性におよぼす影響

偏差応力が透水特性におよぼす影響を明らかにするために，拘束圧をそれぞれ 1MPa，5MPa，10MPa として，偏差応力は，0MPa，2MPa，4MPa，6MPa の 4 段階で試験を行う．各拘束圧につき１本ずつ，計３本の試験体を用いて多段階載荷を行う．

透水係数の計測結果を **Fig.3** に，体積ひずみおよび，せん断ひずみの計測結果を **Fig.4** に示す．

Fig.3 より，等方応力状態において，透水係数は拘束圧の増加に伴い減少する傾向にあり，拘束圧が 1MPa の時 5.6×10^{-9}cm/s，5MPa の時 5.3×10^{-10}cm/s，10MPa の時 2.3×10^{-10}cm/s となり，拘束圧増加に伴い透水係数は減少しているが，拘束圧が大きくなるほど透水係数の減少率は小さくなる．

偏差応力による透水係数への影響としては，拘束圧 1MPa においては，偏差応力が 2MPa のとき，透水係数は１オーダー減少し，2MPa 以上になると透水係数はほとんど変化せず，ほぼ一定の値となる．拘束圧が 5MPa，10MPa においては，偏差応力が 4MPa 以下では漸次わずかに減少する傾向を示し，偏差応力が 6MPa の時の透水係数は，偏差応力が 4MPa の時の透水係数より，拘束圧 5MPa で約２倍，拘束圧 10MPa で約３倍増加しており，拘束圧が 1MPa の場合と異なる傾向を示す．これは **Fig.4** に示すように，せん断ひずみの増加による影響と考えられ，拘束圧 5MPa，偏差応力 6MPa においてせん断ひずみは 11%，拘束圧 10MPa，偏差応力 6MPa において，せん断ひずみは13%といずれも約10%を超えている．また，この時には，偏差応力が大きくなると，拘束圧による透水係数への影響も小さくなる．

５．まとめ

本研究では偏差応力下における難透過性岩石の透水特性評価のため，トランジェントパルス法により透水試験を実施した．その結果，偏差応力が小さく，せん断ひずみが小さな範囲では，拘束圧，偏差応力の増加に伴い，透水係数が減少すること，また，偏差応力が大きくなり，せん断ひずみも約10%を超えると拘束圧の影響は小さくなり，透水係数が増加することがわかった．

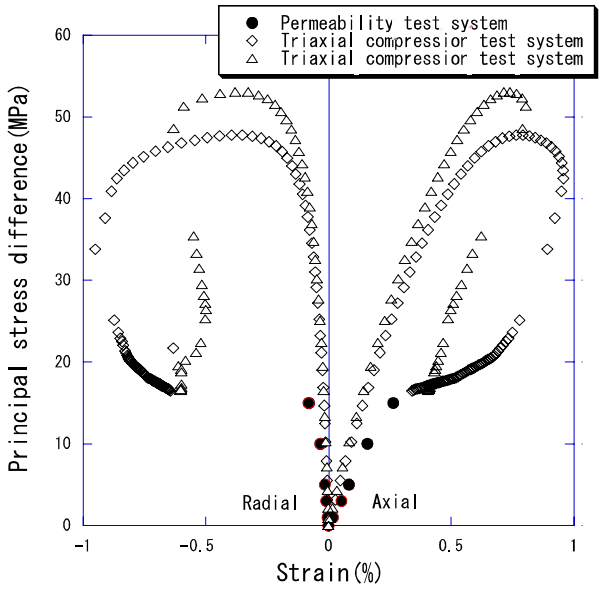

Fig.2 Strain at principal stress difference.

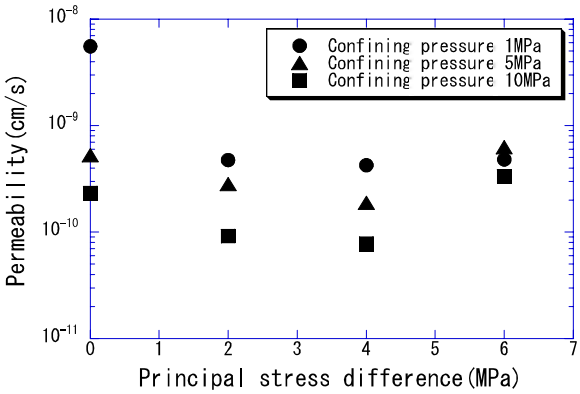

Fig.3 Permeability at principal stress difference.

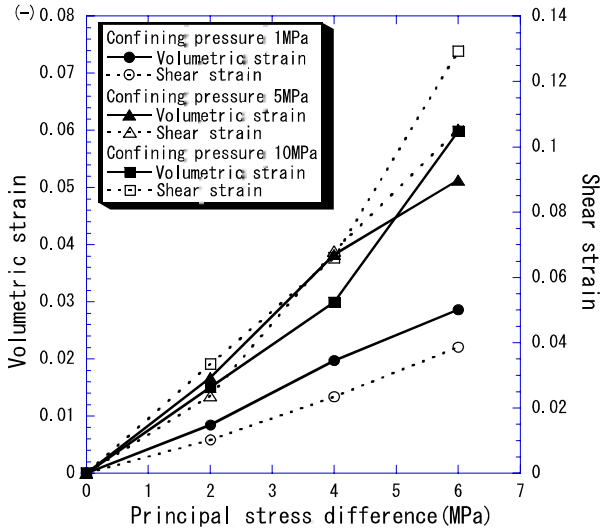

Fig.4 Volumetric strain and shear strain at principal stress difference.