

氏名	佐藤 稔		
学位の種類	博 士 (理 学)		
学位記番号	博 甲 第 7755 号		
学位授与年月日	平成 28年 3月 25日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
審査研究科	生命環境科学研究科		
学位論文題目	Study on Permeability Anisotropy of Sedimentary Rocks during Progressive Deformation under True Triaxial Stresses (真三軸応力下で累進変形する堆積岩の透水異方性の評価に関する研究)		
主査	筑波大学講師	PhD	安間 了
副査	筑波大学教授	理学博士	恩田 裕一
副査	筑波大学准教授	博士(理学)	丸岡 照幸
副査	産業技術総合研究所 上級主任研究員	工学博士	高橋 学

論 文 の 要 旨

地下環境中の透水性評価は、地下水利用に起因する地盤沈下、採油や天然ガスおよびメタンハイドレート利用などのエネルギー資源の開発において遭遇する問題を予測・解決したり、二酸化炭素地下貯留や高レベル放射性廃棄物の地層処分における岩盤の遮水能を評価するなど、資源開発や地盤工学の様々な場面において重要である。とくに断層運動により岩盤にずれが生じた場合、岩盤中の透水性を変化させるため、地下環境利用を進める際には断層運動を考慮したうえで透水性の評価をする必要がある。本研究では新たに開発した真三軸変形透水試験装置により、岩石試料に対して応力を与えて変形・破壊させ、その間の岩石の透水性の変化、とくに岩石の水理特性に与える主応力(応力比)の影響と透水異方性についての知見を深めることを目的とした。

地下環境にある岩石にかかる応力は上載圧によって規制されるが、プレート沈み込み境界付近では圧縮テクトニクスにより複雑な応力場を呈する。円柱形岩石試料に対して周囲から等方的封圧を加える従来型三軸圧縮試験では、このような複雑な応力場を再現することはできない。三次元的な応力状態を室内実験で再現するために、角柱形の岩石試料に対して σ_3 方向に油圧を加え、 σ_2 および σ_1 方向にはピストンで付加して岩石を破壊する茂木型真三軸試験装置を使用した。岩石力学試験の標準物質として使用されるベレア砂岩(空隙率18%程度)や、研究対象とした前弧海盆堆積物の天津泥岩(空隙率40%程度)のように、空隙率の高い堆積岩に応力が加わり断層ができた場合、粒子の破碎や回転により空隙が充填され、変形前に比べて断層部分の空隙率と透水係数が減少することが期待される一方、断層近傍では微小亀裂が発達して選択的な水みちとなる可能性も指摘される。したがって室内岩石実験では、形成された断層面に対して平行な方向と断層面に直交する方向の透水係数を求め、透水異方性を求める必要がある。このため、茂木型真三軸試験に改良を加え、加圧試験中の供試体に対して σ_1 方向と σ_2 方向の2方向の透水性測定を可能にした。

岩石の透水性は岩種によって 10 桁以上の差がある物理量であるうえ、断層により透水係数が大きく変動する可能性があるため、急激な透水係数の変化にも対応でき、比較的幅広い数値の透水係数を取得できるフローポンプ法を選択した。本研究の中で、フローポンプ法で透水試験を行なう際に流量を大きくすることで、精度良く比貯留係数を求めることに成功した。

改良した実験手法と改良型茂木型真三軸試験装置を用いて、35 x 35 x 70 mm の角柱形に整形したベレア砂岩と天津泥岩の変形-透水実験を行なった結果、ベレア砂岩の透水試験では、変形が進むにつれて σ_1 方向と σ_2 方向で大きな透水異方性があらわれた。特に $\sigma_2 > (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ の破壊強度が比較的大きい領域では、 σ_1 方向の透水係数 k_1 は 1 桁程度小さくなった。 k_2 も载荷とともに減少傾向を示したが、最大でも初期の透水係数の 1/2 程度であった。電子顕微鏡での断層面の観察によると断層面周囲に断層ガウジの発達が見られた。断層面は σ_2 に対して平行で σ_1 方向を横切るため、断層ガウジによる顕著な透水係数の減少の原因となった。天津泥岩の変形-透水実験では、中間主応力を増加させても顕著な透水異方性は見られなかった。天津泥岩は強度の低い試料であり、今回設定した封圧の下では断層のような局所的な変形が起こらなかった。海底下で“弱い”泥質岩に断層を発達させるためには、圧密や膠着作用などにより強度が上がることで、有効封圧が下がること、中間主応力が高い条件になることなどが想定される。

審 査 の 要 旨

佐藤氏の研究では茂木型真三軸試験装置を改良した真三軸変形透水試験装置をもちいて、岩石の変形・破壊にいたる間の透水性の変化、主応力(応力比)と透水異方性との関係性を評価した。従来型では一方向しか測定できなかった透水性を、真三軸変形試験装置を改良して二方向で測定する技術を開発したことによって、変形中の岩石試料の透水異方性の変化を明らかにした。佐藤氏は開発途上の試験器の立ち上げ時点から運用をはじめ、試験器と実験手法の改善に貢献しながら、付加体堆積物の透水実験データを提出し、地下における岩石の置かれた応力状態とその履歴が、どのように変形・破壊過程や透水異方性の発達に影響を及ぼすかを提示し、とくに岩石の変形および水理特性に与える応力比の影響について考察した。これらの研究の中で、フローポンプ法透水試験の流量を大きくすることで、精度良く比貯留係数を求めることに成功したこと、岩石の変形挙動は σ_3 だけでなく σ_2 にも依存し、一定の σ_3 応力条件下であっても σ_2 が変化することで断層による透水異方性が顕著になることを示したことは、今後の実験地質学の方向性を示唆する重要な貢献である。

室内岩石実験を行なう最大の利点は、岩石に加える応力を制御できるため、原位置試験が難しい地下深部の岩石に対しても強度や透水係数などの基本パラメータが得られることである。岩盤の変形を加味して地下水流動を予測するためにはコンピュータシミュレーションが行なわれるが、初期条件として入力する基本パラメータは室内岩石実験の結果から得られるものが多い。また、コンピュータシミュレーションで得られた結果を検証するためにも室内岩石実験から得られる結果は重要である。本研究の成果は今後の室内透水実験の高度化に寄与し、これにより地下環境中の複雑な水理・変形挙動の解明につながることを期待される。

平成 28 年 1 月 20 日、学位論文審査委員会において、審査委員全員出席のもとに論文の審査及び最終試験を行い、本論文について著者に説明を求め、関連事項について質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって合格と判定された。

よって、著者は博士(理学)の学位を受けるのに十分な資格を有するものとして認める。