HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	低透水性岩石の水理・圧密特性の評価に関する研究［論文内容及び審査の要旨］
Author(s)	加藤, 昌治
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	乙第6923号
Issue Date	2014-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/55646
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Masaji_Kato_review.pdf, 審査の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称　博士 (工学)　氏名　加藤 昌治

審査担当者　主　査　教　授　金子 勝比古
副　査　教　授　五十嵐 敏文
副　査　教　授　藤井 義明
副　査　准教授　川﨑 了

学位論文題名

低透水性岩石の水理・圧密特性の評価に関する研究
(A Study on Hydraulic and Poroelastic Properties of Low-Permeability Rocks)

岩石の透水性は, トンネルなどの地下空洞の開削に伴う湧水や地下利用に起因する地盤沈下, 人間の経済活動に起因する地下水汚染, 採油や地熱開発あるいは鉱山開発などの鉱物・エネルギー資源の開発で遭遇する課題, 火山噴火や地震, 岩盤崩落や地すべりにおける人間の生命と財産を守るための防災, 高レベル放射性廃棄物の地層処分における天然バリアや二酸化炭素の地中貯留におけるキャップロックの遮水性の評価など, 様々な場面において工学的に重要である. とくに, 天然バリアやキャップロックについては遮水性が求められるため, その遮水性を精度よく評価するためには, 低い透水性の試料に対して高精度な透水試験を実施しなければならないことになる.

岩石の透水性には次の特徴がある. まず, 岩石の空隙構造の多様性に起因して, 岩石ごとに透水性が大きく異なる. 透水係数では大きいものと小さいものを比較すると 10 桁以上の開きがある. そこで, これまでに提案されている複数の透水試験手法について検討し, 本研究の目的に適合した手法を選定する必要がある. また, 岩石は天然の多孔体であるので, それ自体の (とくに空隙構造の) 不均質性や異方性がそのまま透水性に反映されること, さらに, 岩石の透水性は応力状態や環境条件の影響を強く受けること, なども考慮する必要がある.

そこで, 著者は, 低透水性岩石の透水特性および圧密特性の評価を目的として, 透水試験およている. さらに, 岩石の内部構造の可視化と定量評価も実施し, 低透水性岩石の透水性の有効封圧依存性や透水異方性について考察しいている. 本論文の各章の概要は以下のようである.

第 1 章は序論であり, 研究の背景と目的を示している. 岩石の水理挙動と圧密挙動の工学的な重要性を整理し, 既往の研究を展望している. そして本論文の構成を示している.

第 2 章では, 単相流体で飽和した多孔質材料の 1 次元単調浸透流に基づく 6 つの透水試験法の理論解を無次元化して整理し, 体系的に解説している. 透水試験の理論では, 供試体内の水頭分布だけでなく, 感度係数も示し, それぞれの試験の特徴を比較している. 透水試験法の中で, 変水位法とトランジェントパルス法は試験時間が短く, ほぼ同じ速さで平衡状態に達すること, フローポンプ法 (下流側定容積条件) は水頭差が一定となっているが水頭自体は増加し続けること, 感度係数の経時変化は境界条件に強く依存していること, どの手法においても透水係数の感度係数のほうが比貯留率のそれよりも一桁以上大きいこと, 供試体の透水性によってどの試験法を選択すべきかを感度解析から知ることができることなどを明らかにしている.

第 3 章では, 透水試験結果がばらつく要因について考察するため, 第 2 章で紹介した 6 つの透水試験法について実験的に検討した結果を示している. この 6 つの試験法を一つの供試体に対して連続的に適用可能な試験装置を製作し, シーケンシャル透水試験を実施することにより, 試験手法の違いが水理定数の評価結果に及ぼす影響だけを分離して検討した. 試験装置の下流側貯留槽の容積が大きい場合には, 試験方法によらず, 得られた透水係数に良い一致がみられた. 一方, 下流側貯留槽の容積が小さい場合には, トランジェントパルス試験において差圧計のダイヤフラムを介した圧力伝播が起こり, 透水係数が過小評価されることがわかった. この現象に対処するため, 境界条件を変更してトランジェントパルス法の新たな解析解を導出し, 間隙水の挙動について検討した. この新たな理論解と従来の理論解とを比較したところ, パルス圧が初期差圧と等しくならないこと, 差圧が単調減少するとはかぎらないこと, 透水係数の感度が低下することなどを明らかにしている.

第 4 章では, 低透水性岩石の水理定数の高精度評価を目的として, トランジェントパルス法による透水試験についていくつかの検討を行っている. 低透水性の稲田花崗岩に対して高精度なトランジェントパルス透水試験を実施し,Hsieh 等の厳密解を用いて非線形最小二乗法によるデータ解析を実施することにより, 稲田花崗岩の二つの水理定数 (透水係数と比貯留率) を精度よく評価できることを示した. さらに,Brace 等の近似解を使った場合でも, 水の圧縮率ではなく, そこに装置の圧縮貯留量を用いることにより, 透水係数の評価精度が向上することを明らかにしている.

第 5 章では, 非破壊かつ非擾乱で, 多孔質材料の内部構造を可視化し, 空隙構造を定量化する手法について検討している.2 相および 3 相から成る多相構成材料に焦点を当て, マイクロフォーカス X 線 CT スキャナーを利用して試料を断層撮影し, 得られた CT 画像の画像解析により相分離をおこなって各相の体積分率の評価を試みた.CT 画像の相分離 (しきい値選定) 手法としては, ディジタル画像の不鮮明さの原因となる部分体積効果を考慮した混合確率分布モデルに基づく最ゆう法を採用した. 本手法を人工材料 (ガラスビーズ充填試料など) および天然材料 (ベレア砂岩やオイルサンド) の X 線 CT 画像に対して適用し, 砂岩の空隙率の評価やオイルサンドの固液気 3 相それぞれの体積分率の評価に適用できることを確かめた. また, グラウト処理による空隙率の微小変化の抽出にも成功した.

第 6 章では, 低透水性の花崗岩の水理特性について述べている. トランジェントパルス法を用いて稲田花崗岩の透水試験を実施し, 水理定数を評価した. その結果, 花崗岩には透水係数の封圧依存性や異方性のあることを確認した. この透水異方性の解釈のために, 供試体の直交 3 面の顕微鏡観察画像からクラックトレースを抽出し, 岩石内マイクロクラックの 3 次元方位分布を評価する手法を提案し, それを稲田花崗岩に適用した. そして, 稲田花崗岩の透水異方性は, 弾性波速度の異方性や岩石内マイクロクラックの方位分布と良く対応することを明らかにしている.

第 7 章では, 低透水性の泥岩の水理特性と圧密特性について述べている. 花崗岩は低空隙率で低透水性であるのに対して, 泥岩は高空隙率であるが低透水性である. また, 花崗岩に比べて泥岩のほうは剛性が低く, 変形しやすい. そこで, 泥岩に対しては透水試験と圧密試験の両方を実施した. 幌延泥岩を供試体として, トランジェントパルス透水試験を実施し, 透水係数の封圧依存性を確認した. この室内透水試験結果とボーリング孔を利用した原位置水理試験結果とを比較したところ, 低有効封圧側では, 原位置試験で得られた透水係数が室内試験で得られた透水係数よりも 1〜5 オーダー大きな値を示しているが, 有効封圧が 5 MPa を超えたあたりでは両者が同じオーダーの値を示すようになっている. この原位置での透水性の有効封圧依存性は, 地圧によるき裂の閉合に起因していると考え,X 線 CT を使って封圧の増加に伴うき裂の閉合挙動を確認した. さらに, 多孔弾性論を間隙水の挙動に着目して整理して, 三軸圧縮試験のデータに適用できる解析解を導出し, 幌延泥岩の圧密特性を明らかにするために三軸圧縮試験を実施した. 三軸圧縮試験では, 比排水量およびひずみの経時変化のデータを使うことにより, 六つの多孔弾性定数と二つの水理定数が同時評価できることを示している.

第 8 章は結論であり, 本研究で得られた成果をまとめている.

これを要するに著者は, 低透水性岩石の水理定数を評価する上での問題点を明らかにするとともにそれらの解決策を示し, これに基づいて低透水性岩石の水理定数ならびに多孔弾性定数を精度良く評価する方法を提案しており, 岩盤水理学ならびに岩盤工学の発展に貢献するところ大なるものがある.

よって, 著者は北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める.