

学 位 論 文 題 名

砂岩の透水性と微視的構造との関連性に関する実験的研究

学位論文内容の要旨

砂岩の透水性は、従来から石油工学や地熱工学、鉱山工学における重要な研究テーマである。最近では、圧縮空気や石油などの地下貯蔵や、廃棄物の地層部分など、地下空間の新しい応用分野においても、研究の必要性が増している。

本研究は2種類の砂岩と1種類の泥岩を供試体として、トランジェント・パルス法により、静水圧、間隙水圧、差応力下の透水性を調べると共に、特に、砂岩の透水性と微視的構造との関連性を明らかにしたものである。

本論文は全7章から構成されている。

第1章は序論で、本研究の背景および目的、既往の研究の概要、本論文の構成について述べている。

第2章は、岩石の透水係数を測定するためのトランジェント・パルス法について、測定原理に係わる問題を扱っている。従来用いられている厳密解に基づく評価法は、作業が煩雑な割に大きな誤差を伴いやすいこと、また、多くの研究者が用いている近似解に基づく方法は、空隙率の大きい岩石に適用した場合には、結果の信頼性に欠けることを指摘している。その上で、使用が簡便で、しかも正確な評価値の得られる方法を新たに提案している。透水係数は浸透流がダルシーの法則を満たす場合に意味を持つ。そこで、トランジェント・パルス法で実現される浸透流に関して、ダルシーの法則が成立する上限について理論的な検討を行い、成立の判断基準を導いている。そしてこの判断基準を実験結果に適用し、本研究で採用した測定条件の範囲内では、ダルシーの法則が成立していることを確認している。

第3章は、トランジェント・パルス法によって透水係数を正確に測定するための技術的諸問題と、その解決方法について述べている。測定誤差を減らすために、種々の技術を開発しているが、これらの中には、供試体の側面に水を流さないための供試体の処理方法と確認方法の開発、供試体を含水飽和させる方法と確認方法の開発などが含まれている。

第4章は、2つの方法を用いて岩石内部の微視的構造を明らかにする試みをしている。第一は、

岩石の薄片を顕微鏡下で観察し、観察結果を画像処理する方法である。このとき、岩石中に分布する空隙を明瞭に観察するために、予め着色樹脂で空隙を充填する方法を用いている。そして、静水圧の負荷に伴い、白浜砂岩の場合、大きな場合を持ちアスペクト比の小さい空隙が閉鎖すること、来待砂岩の場合、柔らかい構成粒子が塑性変形をすることなどを明かにしている。

第二は、静水圧の載荷・除荷に伴う弾性波速度や体積ひずみの変化を測定する方法である。弾性波速度－静水圧線図、体積ひずみ－静水圧線図の形状や弾性波速度や体積ひずみのヒステリシスの静水圧に対する依存性を基に、微視的構造を間接的に推定する試みをしている。白浜砂岩の場合、静水圧が小さい段階では体積ひずみや弾性波速度の変化が大きいこと、来待砂岩の場合、静水圧が約50MPaになったとき、弾性波速度は顕著な変化を示さないのに、体積ひずみは急激に増加すること、除荷過程では載荷過程よりも弾性波速度が小さくなり、残留ひずみが大きいことなど、多くの知見を得ている。また、これらの挙動の多くは、顕微鏡による観察から推定された岩石の微視的構造の変化によって説明することが可能であることを明らかにしている。

第5章は、トランジェント・パルス法による岩石の透水係数の測定結果を述べている。岩石の透水性に対する静水圧と間際水圧の影響を詳しく調べるために、これらの圧力に関し種々の負荷経路を用いている。特に、繰返し負荷で生じる透水係数のヒステリシスの変化と、静水圧と間際水圧が透水係数へ及ぼす影響の差異を明らかにすることに研究の力点を置いている。

白浜砂岩の場合、一定の間際水圧の下で静水圧を負荷した初期の段階では、透水係数が著しく減少し、またヒステリシスが大きいこと、静水圧が大きくなるにつれて、透水係数の減少の程度とヒステリシスの両方が小さくなることを見いだしている。来待砂岩の場合、静水圧が20～40MPaのとき、透水係数のヒステリシスが最大になり、それ以下の静水圧に対しては、透水係数が除荷に伴い若干回復することを見いだしている。

白浜砂岩については、載荷経路の途中で供試体の破壊を試みている。破壊により数倍大きくなった透水係数は、その後の静水圧の負荷により、速やかに減少し、破断面の影響がなくなること、差応力が負荷した場合、透水係数はあまり変化せず、破壊の直前になって増加することなどを明らかにしている。

第6章は、両砂岩の透水性と変形挙動を、媒体中に管路が分布する二相モデルを用いて解釈する試みをしている。このモデルでは、静水圧や間際水圧が変化すると媒体と管路が変形し、それによって変形挙動がもたらされ、かつ管路中の水の流れが影響を受けて透水係数が変化する。

モデルの媒体が弾性体の場合、透水係数に対する静水圧の影響は、間際水圧よりも大きくなる。また、同一の断面積では、アスペクト比の小さい管路の方が、静水圧の負荷にともなう断面積の

変化が大きく、体積ひずみや透水係数にそれだけ大きな変化をもたらす。さらに、アスペクト比の小さな断面形状を持つ管路が多い場合、静水圧の負荷により、アスペクト比の小さい順に不可逆的に管路が閉鎖するとすれば、静水圧－透水係数線図は下は凸になり、ヒステリシスが生じる。白浜砂岩の透水性の主たる特徴は、このモデルによって説明することができる。

モデルの媒体が弾塑性体であれば、管路の周囲に形成される塑性領域の有無により、管路の断面積の変化する割合が異なる。40MPa 前後の静水圧下で来待砂岩に認められた特異な変形・透水挙動は、これによって説明することができる。

第7章は結論で、本研究で得られた主な結果と今後の展望について述べている。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	石 島 洋 二
副 査	教 授	佐 藤 寿 一
副 査	教 授	中 島 巖
副 査	教 授	三田地 利 之

本論文は、岩石の透水性と微視的構造との関連性を明らかにすることを目的として、2種の砂岩と1種の泥岩を用い、トランジェント・パルス法により、静水圧、間際水圧、差応力下の透水性を実験的に調べたもので、全7章から構成されている。

第1章は序論で、本研究の目的及び既往の研究について述べている。

トランジェント・パルス法に関する基本的問題を扱った第2章では、まず、正確な透水係数の評価方法を浸透流の厳密解に基づいて導出し、併せて、透水係数が間際水圧の関数である場合にも、この評価方法が有効であることを確認している。次に、測定条件がダルシーの法則に適合することを判断するための具体的な基準を導き、この判断基準を用いて、本研究で採用した測定条件の範囲内では法則が成立していることを確認している。

第3章では、トランジェント・パルス法によって透水性を調べるときの技術的諸問題と、それらの解決方法について述べている。とりわけ、供試体の側面を不透水条件にし、供試体を含水飽和させるための方法の開発は特筆に値する。

第4章では、2つの方法により岩石内部の微視的構造を明らかにしている。着色樹脂で空隙を

充填させた岩石薄片を鏡下で観察し、観察像を画像解析する第1の方法により、白浜砂岩の場合、アスペクト比が小さく大きな面積を持つ空隙が静水圧の重荷によって閉鎖すること、来待砂岩の場合、柔らかい構成粒子が塑性変形することなどを明らかにしている。

静水圧の載荷・除荷に伴う弾性波速度と体積ひずみの変化を詳細に調べる第2の方法を基に、白浜砂岩の場合、圧力の小さい段階では体積ひずみや弾性波速度の変化が大きいこと、来待砂岩の場合、ある大きさの圧力を境に、弾性波速度は顕著な変化を示さないのに体積ひずみは急激に増加すること、除荷過程では載荷過程よりも弾性波速度が小さくなること、残留ひずみが大きいことなど、多くの知見を得ている。そして、これらの多くは、顕微鏡による観察から推定された岩石の微視的構造の変化によって説明することが可能であることを明らかにしている。

第5章では、岩石の透水係数の測定結果を述べている。白浜砂岩の場合、一定の間際水圧の下で静水圧を負荷すると、圧力の小さい段階では透水係数が著しく減少し、またヒステリシスが大きいこと、圧力が大きくなるにつれて、透水係数の減少する割合が減り、ヒステリシスも小さくなることを見いだしている。来待砂岩の場合、ある大きさの静水圧の下で透水係数のヒステリシスが最大になり、それ以下の静水圧に対しては透水係数が除荷に伴い若干回復することを確認している。

白浜砂岩については、破壊により透水係数が数倍大きくなるものの、静水圧の負荷により、速やかに非破壊の値に収束すること、差応力を負荷した場合、透水係数はほとんど変化せず、破壊の直前になって増加することなどを明らかにしている。

第6章では、2・3の力学特性を持つ媒体中に管路が分布する二相モデルを用いて、両砂岩の透水性と変形挙動の解釈を試みている。弾性媒体の場合、静水圧の負荷により管路がアスペクト比の小さい順に不可逆的に閉鎖すると仮定したときには、静水圧－透水係数線図は下に凸になり、ヒステリシスが生じる。白浜砂岩の透水性の主たる特徴はこのモデルで説明できる。弾・塑性媒体の場合には、管路の周囲に形成される塑性領域の有無により、管路の断面積の変化する割合が異なる。ある大きさの静水圧下で来待砂岩に認められた変形・透水の特異な挙動はこれによって説明できる。

第7章は結論で、本研究で得られた主な結果を述べている。

これを要するに、著者は、資源開発工学ならびに岩石力学に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。