



Title	破壊過程における来待砂岩の透水特性に関する研究
Author(s)	高田, 迪彦; 藤井, 義明
Description	資源・素材2009（札幌）—平成21年度資源・素材関係学協会合同秋季大会—, 平成21年9月8日～平成21年9月10日, 北海道大学高等教育機能開発総合センター、北海道札幌市.
Citation	資源・素材2009（札幌）企画発表一般発表(A)(S)講演資料, 33-36
Issue Date	2009-09-08
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/39944
Type	conference paper
File Information	takada.pdf



破壊過程における来待砂岩の透水特性に関する研究

北大工 高田 迪彦, 藤井 義明

1. はじめに

放射性廃棄物の地層処分や土壤汚染の浄化、地熱発電、石油貯留層の開発等において、地下環境における物質輸送の把握は重要な課題である。岩盤中の移流現象は地下環境中の物質輸送の主な機構の一つであり、岩盤の固有浸透率など移流現象に関する性質を調査することは重要である。特に放射性廃棄物の地層処分では処分に必要な期間は数万年という長期間に渡るため、様々な環境における岩盤の性質を調査することが必要だと考えられる。また地下構造物周辺の岩盤は掘削によって損傷を受けることがある。さらに長期にわたる処分期間の間には空洞が崩落することなども考えられる。こうしたことから破壊の過程において岩石の性質がどのように変化するかを明らかにすることは重要である。

本研究では破壊過程における岩石の変形挙動と固有浸透率とを明らかにするため、室内実験をおこなった。具体的には来待砂岩を用い、三軸圧縮下において、軸方向の変位を徐々に加えることで差応力を増加させ、岩石を破壊させた。実験の各段階においてトランジェント・パルス法の透水試験を行い固有浸透率を調べた。供試体の側面に貼付けたひずみゲージを用いてひずみを計測した。またこれとは別に岩石の空隙変形量を計測する実験を行った。

2. 供試体・実験装置

2.1 供試体

実験には島根県において産出する来待砂岩を用いた。ボーリングマシンとダイヤモンドカッターを用いて、直径 30 mm、長さ 60 mm の円柱形に加工し、平面研削盤を用いて端面を平坦に加工した。

2.2 実験装置

実験装置の概要を図 1 に示す。これは藤井 (2004) によって開発された超小型三軸圧縮試験システム¹⁾である。軸方向の変位を材料試験機を用いて制御し、封圧は封圧用のポンプを用いて制御した。供試体の両端は中央に孔の開いたエンドピースとアタッチメントを介して透水試験システムと接続している。間隙水圧はシリンジポンプを用いて制御した。ジャケットと供試体の間を水が流れることを防ぐため、供試体の側面にはシリコンゴムを塗布した。

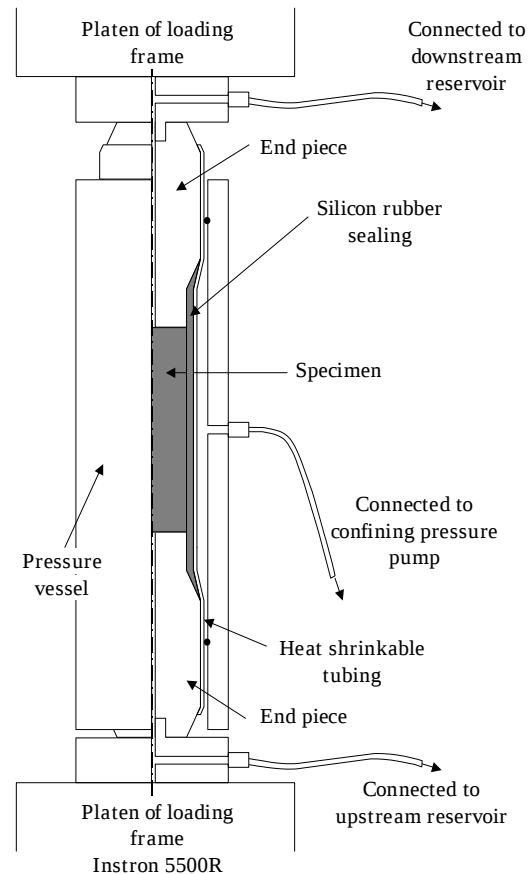


図 1 実験装置の概要

3. 三軸圧縮破壊過程における透水試験

3.1 実験の方法

先に述べた実験装置を用いて三軸圧縮破壊過程における固有浸透率の変化を調査した。この実験では図 2 のように材料試験機のストローク変位を階段状に制御し、岩石を徐々に破壊させた。これは透水試験中の供試体の変形を抑えるためである。間隙水圧は 2 MPa、封圧は 5.0 ~ 15.0 MPa で行った。以下に実験の手順を示す。

- (1) 静水圧を加える。岩石の変形を落ち着かせるため、3 時間ほど置く。
- (2) トランジェント・パルス法による透水試験を行う。
- (3) ストロークを 0.12 mm 増加させる。岩石の変形を落ち着かせるため、3 時間ほど置く。ストローク変位速度は 0.036 mm/min とした。
- (4) トランジェント・パルス法による透水試験を行う。
- (5) (3)、(4)を繰り返す。

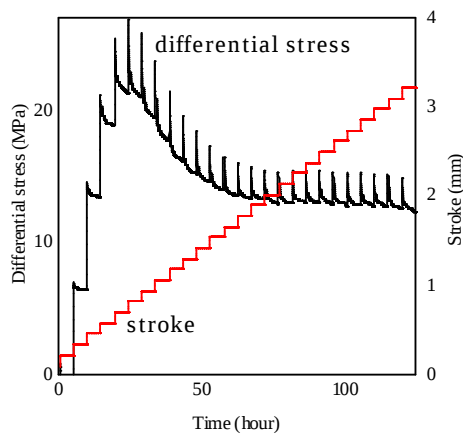


図2 差応力とストロークの時間変化の例

以上の手順でストローク基準の軸ひずみ 5%程度まで実験を行った。トランジェント・パルス法の透水試験に関しては Brace (1968)²⁾を参照されたい。

3.2 実験結果

図3の上のグラフに材料試験機のスロークから求めた軸ひずみと固有浸透率の関係を示す。固有浸透率は差応力が低い段階では、どの封圧でも若干低下した。続いてピーク差応力手前の段階から増加した。封圧が低いほど増加量は大きく、封圧が 10、15 MPa の場合には固有浸透率はほとんど変化しなかった。また残留強度状態において、封圧 5、7.5 MPa の場合には軸ひずみ 4%ほどから固有浸透率の若干の低下が見られた。

ひずみゲージによって計測されたひずみと差応力の関係を図4に示す。差応力が低い段階では比較的線形弾性的な挙動が見られ、差応力がピークに近づくにつれて非線形な応力ひずみ関係が見られた。図3の下グラフはストロークから計算した軸ひずみと差応力の関係を示す。これを見ると軸ひずみがおおよそ 1%ほどのところで差応力はピークに達し、3 から 4%ほどで残留強度状態に達している。ピーク差応力時の軸ひずみは封圧によって変化し、封圧が大きいほどピーク差応力時の軸ひずみは大きかった。また封圧が低いほどピーク差応力と、残留強度状態の応力の落差が大きかった。

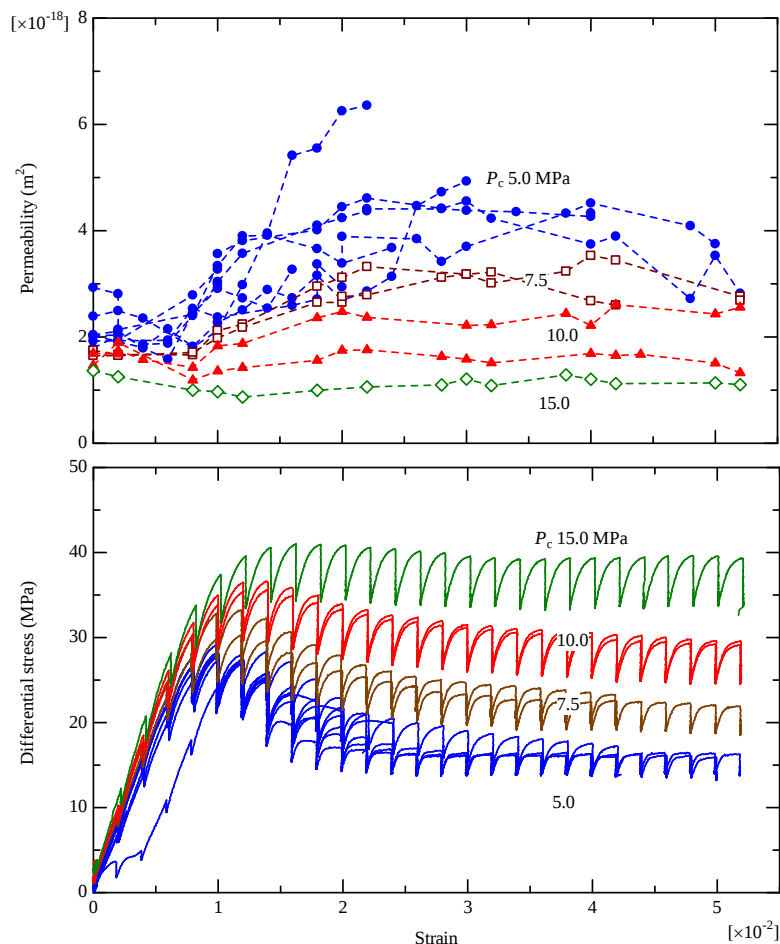


図3 グラフ上: 軸ひずみと固有浸透係数の関係
グラフ下: 軸ひずみと差応力の関係

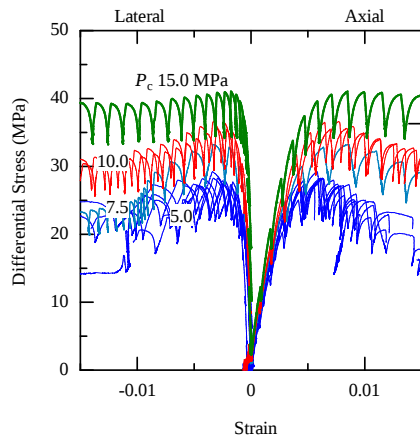


図4 応力ひずみ線図

4. 空隙変形量の計測

4.1 実験の方法

岩石中を水が流れる際には、水は空隙部分を通るため、岩石の空隙率と固有浸透率とは密接に関係すると考えられる。このため三軸圧縮試験中の空隙変形量の計測を行った。空隙変形量の計測はシリンジポンプを用いて、空隙水量の変化を計測することで求めた。また2.3の

実験と同じくひずみゲージによってひずみも計測した。この実験では透水試験は行っていないので、定変位速度で軸方向载荷を行った。実験は封圧 5 MPa で変位速度 0.0036、0.006、0.012 mm/min、封圧 10 MPa で変位速度 0.0036 mm/min の4つ条件で行った。

4.2 実験結果

図5に実験結果を示す。グラフの横軸はひずみ、縦軸は差応力を示している。破線はシリンジポンプによって計測した空隙水量の変化を供試体積で割った量で、これは収縮を正にとった空隙率変化と考えられる。実線はひずみゲージによって計測した体積ひずみ（軸ひずみ+周ひずみ×2）である。空隙率変化と体積ひずみは近い値であった。またこれらは封圧が大きく、载荷速度が遅いほど近い値となった。

5. 考察

5.1 破壊過程における変形挙動と固有浸透率

ここでは実験の結果を下に、破壊過程における変形挙動と固有浸透率の変化を引き起こすメカニズムについて考察する。

4の結果から空隙率変化と体積ひずみが近い値とな

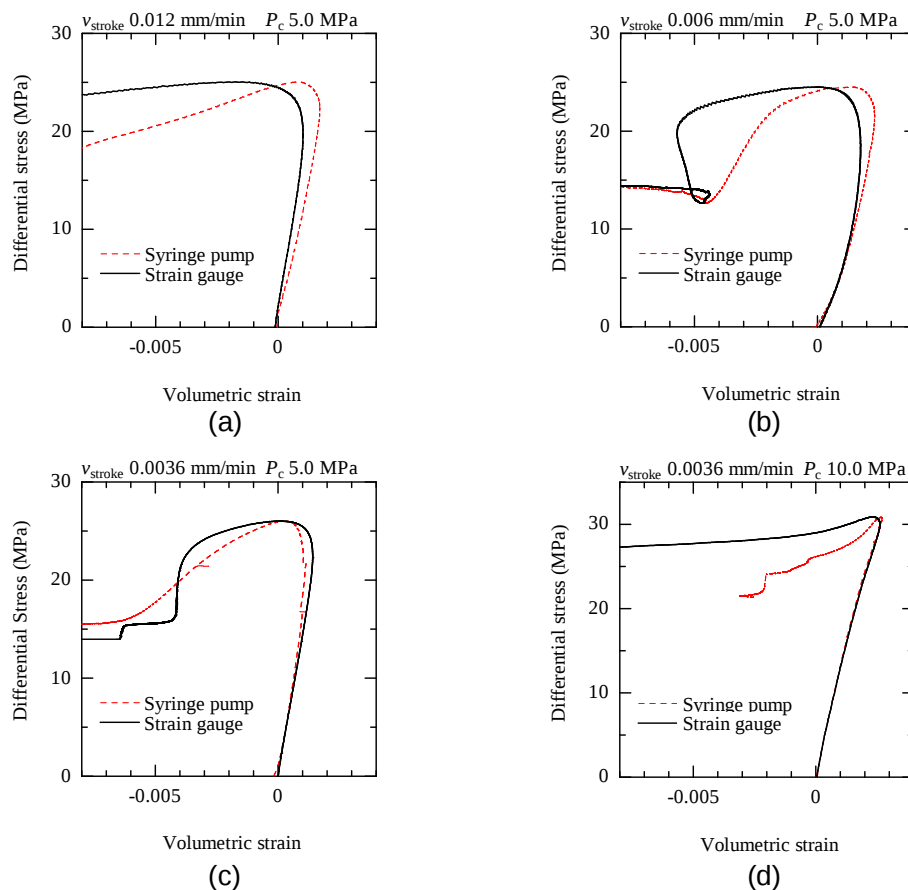


図5 シリンジポンプによって計測された空隙率変化（破線）と、ひずみゲージによって計測された体積ひずみ（実線）。横軸は共に収縮が正を示す。

った。これは岩石の鉱物部分の変形が空隙の変形よりも小さいことを示している。また空隙率変化は 1%以下と小さい。1%ほどの空隙率の違いは供試体のごとのばらつきによっても生じ得るため、破壊過程における固有浸透率変化の原因は岩石の構造の変化によると考えられる。

差応力が低い段階においては線形弾性的な変形と、固有浸透率の低下が見られた。固有浸透率の低下は圧縮によって流路の閉塞が起こったためだと考えられる。

差応力が増加し、ピークが近づくにつれダイラタンシー挙動が見られた。ダイラタンシーを引き起こす構造のモデルとして、wing crack がある³⁾。wing crack が生じると、载荷軸方向に平行な方向に流路が発達すると考えられる(図 6)。ピーク強度付近における固有浸透率の増加はこうした亀裂構造の発達によると考えられる。

封圧が低い場合には残留強度状態に達するまでに巨視的破断面が形成が起こり、これによって固有浸透率はさらに増加した。また残留強度状態に入ってからしばらくして、固有浸透率が低下した原因は巨視的破断面においてすべりが起こり、破断面の開口幅の減少が起こったためだと考えられる。

5.2 封圧の影響

実験の結果、封圧の影響がはっきりと見られた。封圧が高い場合には固有浸透率の変化は小さく、封圧 15 MPa の場合にはほとんど変化が見られなかったが封圧 5 MPa の場合には比較的大きい変化が見られた。これは破壊形式の違いによると考えられる。封圧を増加させることで、破壊の形式は脆性から延性に化する⁴⁾。脆性的破壊では巨視的な破断面が形成するために、破壊後に封圧が高い場合より固有浸透率が増加したと考えられる。

5.3 計測された空隙率変化と体積ひずみについて

4の結果において空隙率変化と体積ひずみはおおよそ近い値であったが、封圧が低く、変位速度が速い場合には若干の違いが見られた。封圧 5 MPa、変位速度 0.012 mm/min と 0.006 mm/min の実験では体積ひずみの方が

空隙率変化よりも小さかった。この原因として供試体の変形が一樣でなかったことが考えられる。供試体端面は平面研削盤を用いて平坦に加工したが、エンドピースとの間にはある程度摩擦力が生じ、これによって端面近くでの膨張が妨げられ樽型に変形したことが考えられる。封圧が高い場合には周方向の膨張は元々小さいので変形が比較的一様であったと考えられる。変位速度が影響した原因は明らかではないが、一様な変形を加えるには変位速度が遅いほうが望ましいと予想される。

6. まとめ

本研究では三軸圧縮破壊過程にある岩石の性質を調査する実験を行った。実験により再現性のある結果が得られ、封圧 5.0 から 15.0 MPa、室温の状況で、破壊過程における変形挙動と固有浸透率変化が明らかとなった。得られた知見を以下に簡単にまとめる。

- (1) 来待砂岩を用いた三軸圧縮試験において空隙率変化と体積ひずみは近い値であり、岩石の鉱物部分の変形は小さいと考えられる。空隙率変化は小さく、岩石構造の変化が固有浸透率の変化を引き起こしたと考えられる。
- (2) 差応力が低い段階では固有浸透率は若干低下した。この原因は圧縮による流路の閉塞が考えられる。
- (3) ピーク強度手前から残留強度にかけて、封圧が低い場合には固有浸透率は増加した。これは载荷軸方向に長い亀裂構造の発達によると考えられる。
- (4) 封圧による影響が顕著に見られ、封圧が高い場合には固有浸透率はほとんど変化しなかった。封圧が低い場合には破壊の形式は脆性的であり、巨視的破断面が形成し、より固有浸透率の増加が起こったと考えられる。
- (5) 封圧 5、7.5 MPa の実験では残留強度状態において若干の固有浸透率の低下が見られた。これは巨視的破断面の開口幅がすべりによって減少したためと考えられる。

引用文献

- 1) 藤井義明 (2004) 資源・素材 2004 (盛岡) 企画発表・一般発表(A)(B)資料、pp. 73-74.
- 2) Brace, W. F., Walsh J. B., and Frangos, W. T. (1968), Journal of Geophysical Research, Vol. 73, NO. 6, pp. 2225-2236.
- 3) Horii, H. and Nemat-Nasser, S. (1986), Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 319, No. 1549, pp. 337-374.
- 4) M.S.パターソン、(1986) 実験岩石力学、古今書院。

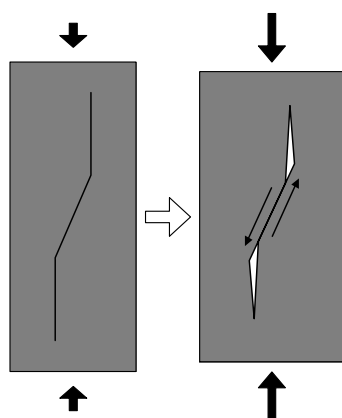


図 6 Wing crack