

差応力下での来待砂岩の 透水性に関する研究

高田 迪彦^{1*}・藤井 義明¹

¹北海道大学大学院 工学研究科環境循環システム専攻 (〒060-8628札幌市北区北13条西8丁目)

*E-mail: takada@rock.eng.hokudai.ac.jp

差応力下での来待砂岩の破壊を含む変形過程における透水性について調査を行った。具体的には、三軸圧縮下で軸方向収縮ひずみを断続的に増加させていき、各段階でトランジェント・パルス法の透水試験を実施し透水係数を測定した。弾性域で若干低下した透水係数はピーク強度付近から増加し始め、残留強度状態に入ってもしばらく増加したが、その後低下が見られた。

Key Words : permeability, sand stone, transient-pulse method, differential stress, fractured rock.

1. はじめに

地下環境での物質移行に関わる岩石の透水性は、放射性廃棄物の地層処分安全性検証などにおいて重要であり、既に様々な状況について研究が行われている。本研究と同様に来待砂岩を用いた研究としては薛ほか¹や熊倉ほか²が挙げられる。また破壊を含む過程の透水性に関する研究としてはNgwenya et al.³などがあるが、破壊を含む過程の岩石の透水性についてはまだ充分には調べられていない。本研究では最大で軸方向収縮ひずみ(ストローク/供試体長さ)を4%ほどまで加える、比較的長時間の実験を行った。

2. 実験装置と実験方法

(1) 実験装置・供試体

実験装置の概要を図-1に示す。この装置を用いて三軸圧縮下でのトランジェント・パルス法透水試験を行った。この装置では軸圧を材料試験機を用いて加え、封圧を封圧ポンプによって加える。透水試験装置はシリンジ・ポンプ、配管類、バルブ、圧力容器からなっており、間隙水圧はシリンジ・ポンプで制御している。トランジェント・パルス法の透水試験についてはBrace et al.⁴などを参照されたい。

供試体は直径30 mm、長さ60 mmの円柱形に加工したものを用いた。また側面にクロスタイプのひず

みゲージを貼付、ひずみを計測した。

(2) 実験の手順

実験の手順は以下のようである。

- 静水圧を加える。静水圧の値は5 MPa、間隙水圧は2 MPaとした。変形が落ち着くまで3時間ほどそのままの状態に置く。
- 透水試験を行う。透水試験時のパルス上昇圧は0.2 MPaほどにした。

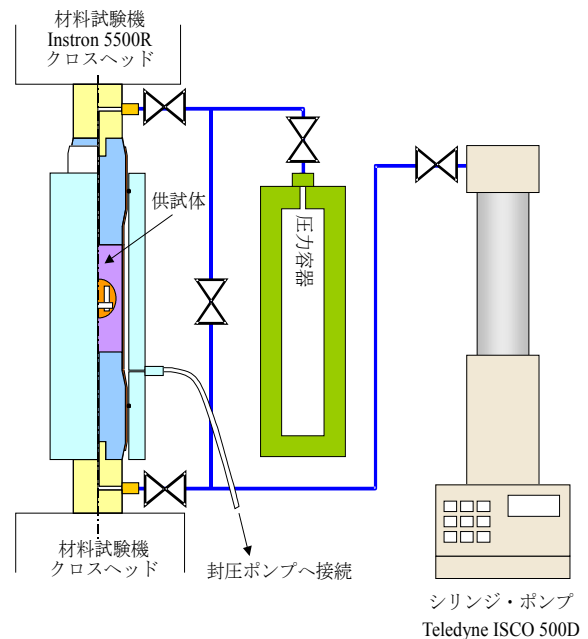


図-1 実験装置概要

- c) 軸方向収縮ひずみ (ストローク/供試体長さ) を 0.2%増加させる(一部 0.4%増加させた). 変形が落ち着くまで3時間ほどそのままの状態に置く.
 - d) 透水試験を行う.
 - e) c), d)を繰り返す
- 軸方向収縮ひずみを増加させる間隔は 4~5 時間になるように努めたが, 手動制御のものはばらつきがかなりある. 途中からストロークを自動制御するようにした.

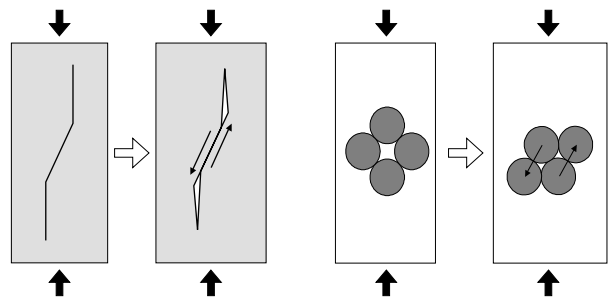


図-4 応力緩和と周方向膨張を伴う変形の想像図

3. 実験結果と考察

(1) 変形挙動の推移

実験で見られた変形挙動の推移を大まかに説明する. 実験によって, 変形挙動やデータにばらつきはあるが大まかな流れとしては一致すると思われる. 図-2 には差応力の時間変化と, 供試体の外観の推移を示した. 変形挙動の推移を図-2 のように 4 段階に分けて説明する.

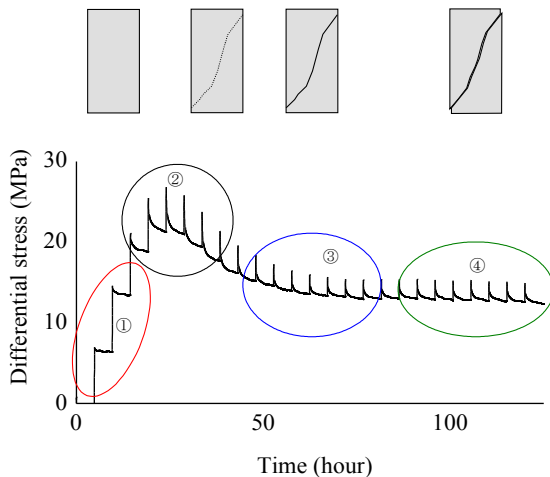


図-2 差応力と外観の推移

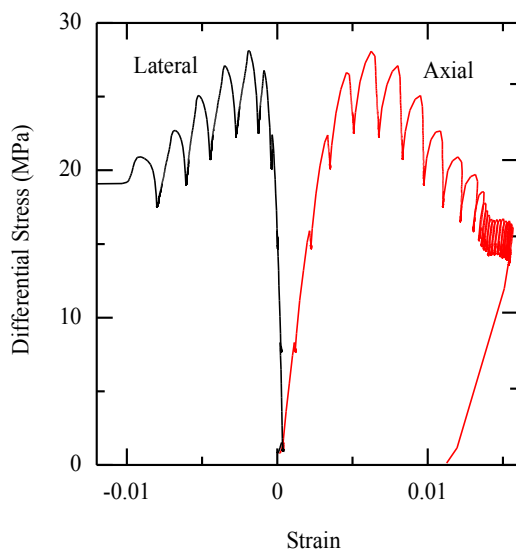


図-3 応力ひずみ線図の一例

①の段階ではストローク増加時の変形はほぼ弾性的な挙動を示し, ストローク停止時の応力緩和も比較的少なかった. この段階では透水性は若干の低下を示した.

②の段階では図-3 のように, ストローク増加時の応力ひずみ関係は徐々に非線形になり, ストローク停止時の応力緩和量も増大した. ピーク強度付近では, 5 時間ほどでは応力緩和が収束しなかった. 透水性はこの段階から増加を始めた. またピーク強度を過ぎて差応力が低下していく段階では透水性はあまり変化しないか, 低下する場合があった.

③の段階で差応力の低下がほぼ終わり, 残留強度状態に至った. 実験後の供試体の外観からこのあたりで巨視的な亀裂が供試体を横断するようである. 破壊形式は全て巨視的破断面が一つできるせん断破壊であった. この段階で透水性は増加した.

④の段階では, 形成された破断面でのすべりが生じていると思われる. この段階の透水性は最初増加が見られたが, 途中から低下した.

(2) 応力緩和時の変形挙動

ピーク強度付近において, 応力緩和が最も顕著に見られた. 応力緩和時はストロークが停止しているため, 軸ひずみはあまり変化していないが, 周ひずみはかなり変化が見られた. この周方向の膨張と応力緩和の原因として, 部分的なせん断を伴う変形が考えられる. ストロークが停止しているので, 何らかのせん断を伴う変形が起こらなければ, 軸方向のひずみは解放されず規模の大きい応力緩和は起こらないと思われる. このような変形過程としてはせん断亀裂でのすべりや鉱物粒子の再配列などが考えられる. 例えば図-4 のような変形は応力緩和と周方向の膨張を引き起こすと思われる. この図はあくまで, 想像図であって岩石の観察に基づくものではない.

(3) 巨視的亀裂の形成

岩石内部での微視的な損傷は, 差応力が加わる過程で常に進行していると思われるが, 供試体を横断する巨視的な亀裂が完全に形成されるのは残留強度付近になってからであった. 実験中の外観は観察していないので, これは実験後の供試体の観察に依る.

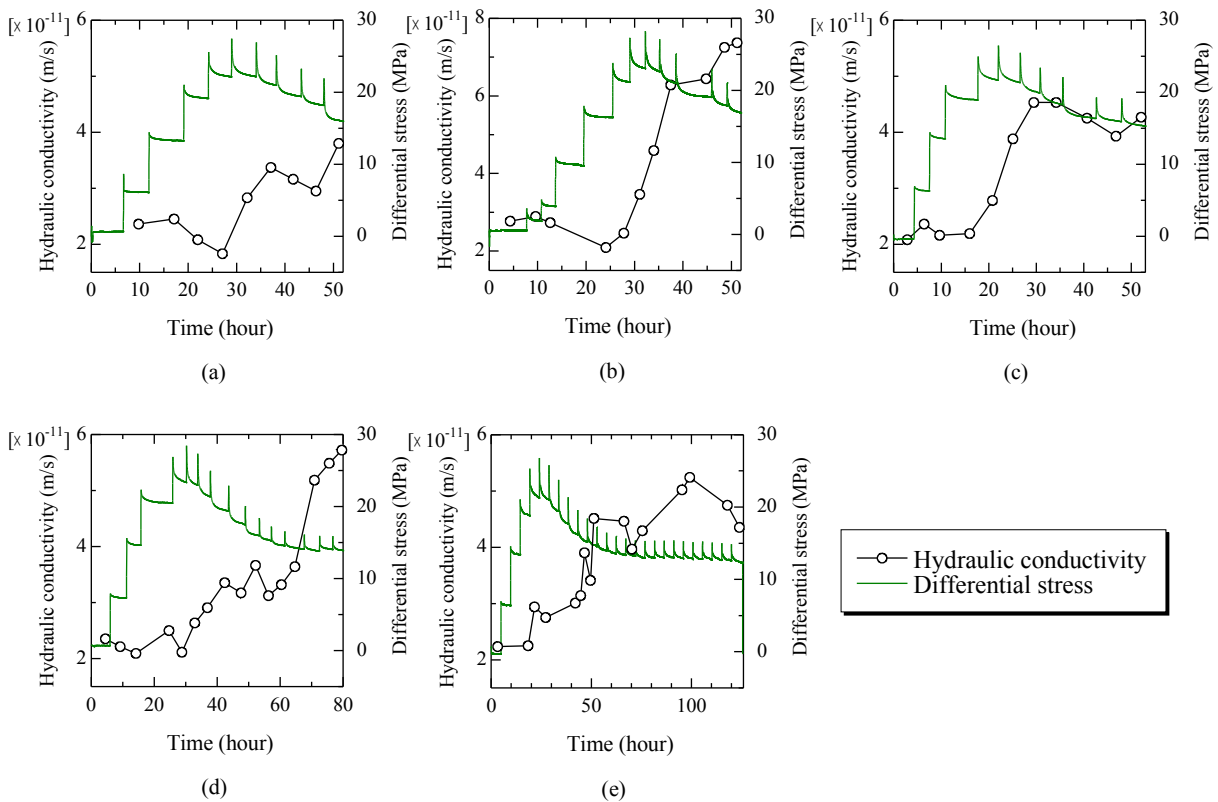


図-5 透水係数と差応力の時間変化

観察が実験前後だけなので巨視的亀裂がどのあたりで形成されたかについては確かなことはわからないが、ひずみゲージにより計測されたひずみの挙動を巨視的亀裂形成の指標として考えることができると思われる。残留強度手前の軸方向収縮ひずみの挙動に注目するとストローク停止時に若干減少している。これは巨視的亀裂ができたために、ここでせん断が起り軸方向のひずみが解放されたためだと考えられる。また周方向伸びひずみが急激に増加した点でも巨視的亀裂の形成が進んだと考えられる。

(4) 巨視的亀裂でのすべり

残留応力状態では形成された巨視的亀裂でのすべりが起こることが考えられる。形成された亀裂の表面は凹凸を有し、すべりが起こることで亀裂の開口幅が広がることが考えられる。残留強度状態はじめての透水性増加はこのような開口幅増加に因ると考えられる。またその後さらに破断面で滑りが起こると、開口幅の変化や、ガウジの生成が起こることが予想され、透水性も変化することが予想される。しかしまだこの段階まで達している実験は一例しか行っていないため、この段階の挙動について考察することは難しい。

(5) 透水性変化と変形挙動

2.において説明した方法により行った実験で計測された透水係数と差応力の時間変化を図-5(a), (b),

(c), (d), (e)に示す。透水係数の最小値は平均で 2.07×10^{-11} m/s、最大値は平均 5.33×10^{-11} m/s だった。

供試体の変形による空隙構造の変化と透水性の変化の関係を見るため、Kozeny-Carmanの式に基づいて考察を行う。Kozeny-Carmanの式⁵⁾は以下である。

$$\frac{Q}{A} = \left(\frac{L}{L_e} \right)^2 \frac{\eta^3}{k_k S_v^2 (1-\eta)^2} \frac{\Delta P}{\mu L} \quad (1)$$

Q : 流量 A : 断面積
 L : 供試体長さ L_e : 実効長
 η : 空隙率 S_v : 比表面積
 ΔP : 水圧差 μ : 水の粘性係数
 k_k : 定数

この式は粉体層の透過流動の研究において考えられたもので、空隙の性質と透水性が簡単に関係付けられている。この他にも空隙構造と透水性を結びつける様々なモデルが提案されており、林ほか⁶⁾などにまとめられている。

岩石の体積ひずみの大部分が空隙の増減によるものだと考え空隙率 η を大気圧下での空隙率 η_0 と体積収縮ひずみ ε_v の差 $\eta = \eta_0 - \varepsilon_v$ と考える。また空隙率以外の値については一回目の透水試験により得られた透水係数から定数として求める。これによって計算される透水係数と実際に計測された透水係数の時間変化を図-6に示す。これ

は図-5(b)の実験結果に基くものである。

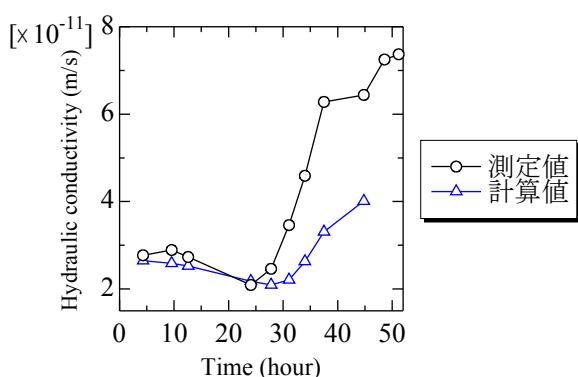


図-6 透水係数の計測値と計算値

図-6を見ると開始から24時間ほどのところまで測定値と計算値は近い値となっている。このことから実験初期の透水性低下は空隙率低下が主な原因であり、他の空隙構造の性質はあまり変化していないと考えることができる。またこれ以降については比較的長い亀裂が発生することで、空隙の実効長が減少し、透水性が増加したと考えられる。

残留強度近くでの透水性増加は巨視的亀裂形成によると考えられ、巨視的亀裂のせん断によって亀裂の開口幅が広がったために、残留強度状態でもしばらく透水性が増大したと考えられる。また、その後透水性低下が見られた。この段階での実験はまだ1例しか実施していないので、再現性のある結果かどうかは分からないが、破断面においてすべりが起こることで亀裂開口幅が変化し、透水性が変化したものと推測している。

4. まとめ

来待砂岩について差応力を変化させる過程における変形挙動と透水性変化について調べた。

(1) 差応力が低い段階では、供試体は弾性的な変形挙動を示し、透水係数は低下が見られた。透水係数

低下の原因としては空隙率の低下が考えられる。透水係数はこの段階で最小となり最小値は平均で 2.07×10^{-11} m/s であった。

(2) 差応力が増加し、ピーク強度付近になると応力ひずみ関係は非線形になり、応力緩和量の増加が見られた。最大差応力は平均 27.5 MPa であった。この段階から周方向伸びひずみが目立って増加した。透水係数も増加が見られた。透水係数増加の原因としては空隙率増加と亀裂の伸長が考えられる。

(3) 残留強度状態での差応力は平均で 13.1 MPa であった。残留強度状態に入ってからもしばらく透水係数は増加を続けた。透水係数の最大値は平均 5.33×10^{-11} m/s であった。残留強度状態での透水性増加は巨視的亀裂のせん断による開口幅増加が考えられる。また一例だけではあるがこの後の透水性は低下した。

参考文献

- 1) 薛自求, 石島洋二, 高橋学: 砂岩の微視的構造と透水特性, 資源・素材学会誌, No. 108, pp. 769-775, 1992年.
- 2) 熊倉聡, 木山保, 西本壮志, 石島洋二, 藤井義明: 破壊した来待砂岩の透水性に関する研究, 資源・素材学会平成19年度春季大会講演要旨集(I)資源編, pp. 111-112, 2007年.
- 3) Ngwenya, B. T., Kwon, O., Elphick, S. C. and Main, I. G.: Permeability evolution during progressive development of deformation bands in porous sand stones, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, Vol. 108, NO. B7, pp. ECV6.1-ECV6.14, 2003.
- 4) Brace, W. F., Walsh J. B., and Frangos, W. T.: Permeability of Granite under High Pressure, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, Vol. 73, NO. 6, pp. 2225-2236, 1968.
- 5) 三輪茂雄: 粉体工学通論, pp. 76-77, 日刊工業新聞社, 1981年.
- 6) 林為人, 高橋学, 西田薫, 張銘: 透水挙動に関する等価管路モデルおよび堆積岩への適用例, 応用地質, 第39巻, 第6号, pp. 533-539, 1999年.

A STUDY ON PERMEABILITY OF KIMACHI SANDSTONE UNDER DIFFERENTIAL STRESS

Michihiko TAKADA, Yoshiaki FUJII

Permeability of Kimachi sandstone under differential stress was measured. Axial displacement was gradually increased to apply differential stress under triaxial condition. Permeability test by transient-pulse method was carried out at each stage. Permeability decreased in elastic region and then increased as peak strength approaches. In residual strength region, permeability also increased at first, but it decreased after a while.