

(28) パルス試験による単一亀裂の透水特性の有効封圧依存性に関する研究

大成建設（株）技術研究所 正会員 ○ 岩野 政浩

大成建設（株）技術研究所 正会員 青木 智幸

大成建設（株）技術研究所 正会員 飯星 茂

Effect of Effective Confining Pressure on Permeability of a Single Rock Joint using Transient Pulse Method

Masahiro Iwano Taisei Corporation Technology Research Center

Tomoyuki Aoki Taisei Corporation Technology Research Center

Shigeru Iihoshi Taisei Corporation Technology Research Center

Abstract

The permeability of three different rock joints was measured at pressures up to 40 MPa by using transient pulse method. Joints samples were natural joint, tension microcrack and sawed joint in Kikuma Granodiorite. Natural joint was axially cored, tension microcrack of an originally intact core was induced by the Brazilian test - specimen did not split apart but X-ray investigation showed that a persistent joint was induced and sawed joint was an actually split cylinder joint with surfaces prepared with number 120 grit. The permeability of intact host rock ranged from about 10^{-12} to 10^{-11} cm/sec. The permeability of three different joints (natural joint, tension microcrack and sawed joint) ranged from about 10^{-8} to 10^{-6} cm/sec, about 10^{-11} to 10^{-9} cm/sec and about 10^{-6} to 10^{-7} cm/sec respectively. Permeability hysteresis and an ultimate decrease in permeability in three different joints were observed during both external confining pressurization and internal pore pressure cycle. As Kranz et. al (1979) observed, joint permeability was not a simple function of the conventional effective confining pressure; simple difference between external confining pressure (P_c) and internal fluid pressure (P_p). They used the values of b/a which could characterize the change of permeability ($b \, dP_p - a \, dP_c$). In this study, a and b for joints were also observed and discussed.

In conclusion, those values for single rock joints could not be constant with effective confining pressure and were functions of both external confining pressure and internal fluid pressure as well as stress history.

1. はじめに

岩石の透水特性に及ぼす封圧や間隙水圧の影響については数多くの研究者^{1)~3)}による報告がなされ、一般的には封圧の増加とともに透水係数は単調に減少し、間隙水圧の増加とともに透水係数は単調に増加することが確認されている。またその程度は岩種に依存し、岩石の間隙やクラック構造との関係を中心に議論されている^{4)~5)}。しかしながら、岩盤中に存在する亀裂の透水特性に及ぼす封圧や間隙水圧の影響については、研究例が少ないのが現状である⁶⁾。本研究では、花崗閃緑岩を母岩とする自然亀裂、圧裂引張り亀裂、研磨された切断亀裂の3種類の単一亀裂の透水特性に及ぼす有効封圧の影響を計測し、母岩の透水特性の有効封圧依存性と比較しながら考察を進め、単一亀裂の透水特性の有効封圧依存性及び応力履歴依存性について考察を加えた。計測は、Braceら⁷⁾によって提案されたトランジェントパルス法に基づいて、青木ら⁸⁾が設計・製作した高精度トランジェントパルス透水試験専用機を用い、封圧と間隙水圧を独立に段階的に変化させて有効封圧を上昇・下降させる試験を繰返し実施した。実験結果より、Krantzら⁹⁾が透水特性の有効封圧依存性を議論する際に用いた透水係数-有効封圧曲線の傾きから得られる a 値に着目し、その大きさと変化について検討を加えた。

2. 実験概要

2. 1 実験に用いた試料と準備

実験には、愛媛県菊間町産の花崗閃緑岩を用い、その基本物性値を表－1に示す。自然亀裂を含む供試体は、中央部に自然亀裂が軸方向に貫通する形で、直径5 cm、長さ5 cmの円柱状に整形した。また、圧裂引っ張り亀裂は、直径5 cm、長さ5 cmの円柱状に整形した岩石試料を低速度の変位制御で圧裂し、ロードセルにて得られた荷重から試算される引っ張り応力の変化を監視し、下降点に達した直後に除荷して作成した。切斷亀裂は、円柱状供試体の中央部をダイヤモンドソーで軸方向に切斷し、切斷両面を120番の研磨剤で研磨して作成した。供試体側面亀裂部は、水中硬化エポキシでシールした後、脱気法によりイオン交換水中で完全飽和させ実験に用いた。さらにX線吸収率の違いから材質の違いを認識することができる産業用X線CTスキャナー（東芝製）を利用して、圧裂引っ張り亀裂の貫通の程度や位置等の供試体内での状況を検査した。図－1に横断面での計測画像の一例を示す。図中自然亀裂、せん断亀裂程明瞭ではないが、供試体のほぼ中央部に誘発された圧裂引っ張り亀裂がほぼ貫通している様子が観察できる。

2. 2 実験装置の構成

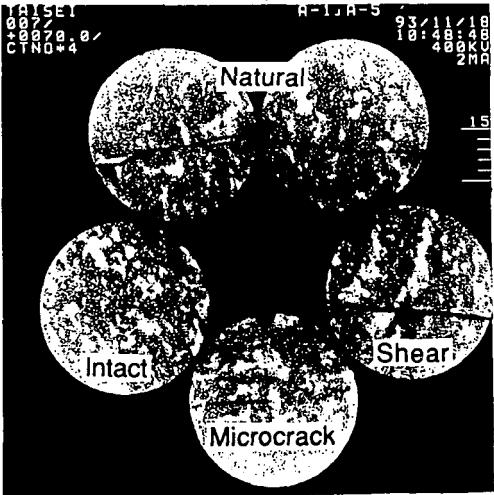
図－2に本試験装置の概念図を示す。本試験装置の基本仕様は封圧（軸力、側圧共独立）最大50 MPa、間隙水圧最大50 MPa、上流側・下流側貯留系の容積は415 ccであり、試験片の寸法は直径50 mm、高さ50 mm以下である。測定精度を向上するため、貯留の剛性の確保、リーク対策、温度制御等について検討を加え、十分な精度が得られることについては確認している。（詳細については、参考文献8）を参照） また、試験片に封圧を加えるため試験片をゴムスリーブで覆うが、母岩の透水係数の計測には難透水性のため長時間を要し、このゴムスリーブの浸透性が問題となる。本実験では、フッ素ゴム（Viton）製のゴムスリーブを用いており、計測期間が数日以上にわたる 10^{-11} cm/secオーダーの透水係数迄問題なく計測できることは確認している。

2. 3 実験内容

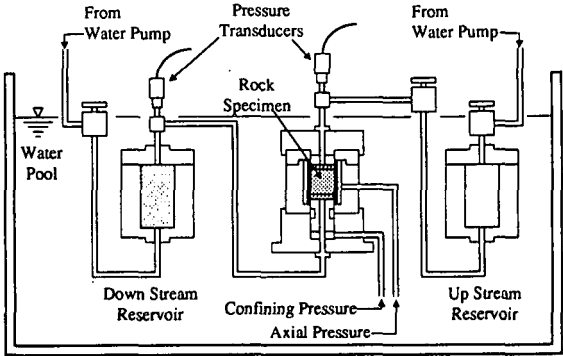
亀裂を含んだ供試体の実験に先立ち、母岩の透水特性の計測を実施した。実験は間隙水圧を2 MPaで一定として、封圧を3 MPaから42 MPa迄段階的に上昇させ各段階毎に透水係数を求める試験(A-test)と封圧を38 MPaで一定とし、間隙水圧を37 MPaから2 MPa迄段階的に下

表－1 菊間花崗閃緑岩の物性値

単位体積重量	26.3	kN/m ³
ヤング率	32	GPa
ポアソン比	0.23	
P波速度	4.38	km/sec
S波速度	2.56	km/sec
透水係数	5.0×10^{-11}	cm/sec
有効間隙率	0.59	%



図－1 X線CTスキャンによる計測画像



図－2 試験装置

降させ各段階毎に透水係数を求める試験(B-test)を実施した。この場合、封圧から間隙水圧を差し引いた通常の有効封圧で見ると、両者共有効封圧を1 MPaから各々4.0 MPa (A-test) , 3.6 MPa (B-test) 迄上昇させたことになる。3種類の亀裂を含んだ供試体についても同様の試験 (A-test, B-test) を実施したが、この場合には有効封圧を上昇させた後、上昇過程と同じステップで下降させ、さらにもう一度上昇・下降を繰返し、各段階で透水係数を計測する試験を実施した。各計測においては、ダルシー則を満足する条件として高橋ら¹⁰⁾によって示されているパルス圧を設定間隙水圧の1/10以下を満足するように全試験で0.2 MPaとしたが、手動ポンプでパルス圧を設定するため細かい設定が難しく、実際には0.2~0.4 MPaとなっている。各亀裂に対する試験の一連の計測日数はほぼ1ヶ月であるが、室温は±1℃に空調されており、水温の日変化は±0.1℃程度以下で抑えられているため、また一回の試験の計測時間は約10分程度であり、この間の水温変化は微小で精度上問題ないと考えられる。図-3に計測

結果及びBrace法による解析結果の一例(自然亀裂, A-test, 有効封圧4.0 MPa)を示すが、計測結果及び解析結果(差圧が初期水圧パルスの1/10になるまでの直線部分利用)とも良好な結果が得られている。なお亀裂を含む供試体の計測結果より亀裂自体の透水係数を算定するためには、亀裂開口幅の値が必要であり、透水に寄与する亀裂開口幅の設定手法(Tsang¹¹⁾, 1992)や封圧変化時の開口幅・接触状態変化の推定(Walsh¹²⁾, 1981)等の未解明の問題があるため、本研究ではBrace法による解析を行い、亀裂の透水特性と等価な透水特性を有する連続体(供試体断面積換算)の透水係数を求めた。

3. 実験結果

3.1 母岩供試体

図-4に母岩供試体のA-test及びB-testの結果を併せて示す。両試験結果は、高橋⁵⁾が稲田花崗岩について得た結果と同様に、透水係数の対数値と有効封圧の関係は直線となり、Krantzらが行ったようにa, b値を各々求めると各々0.0558及び0.0577となる。またその比b/aは1.03とほぼ1に近くなり、本試験で用いた菊間花崗閃緑岩の透水係数に及ぼす封圧と間隙水圧の影響はほとんど等しく、通常の有効封圧を用いて議論できよう。

3.2 亀裂を含んだ供試体

図-5及び図-6に3種類の亀裂に対するA-test及びB-testの結果を各々示す。自然亀裂の結果においては、1回目のサイクルで大きなヒステリシスが観察され、等価透水係数は4.0 MPa迄の有効封圧変化で 10^{-6} から 10^{-8} まで変化する。引っ張り亀裂の場合には、ヒステリシスは自然亀裂より小さいものの、有効封圧の初期上昇の過程で亀裂の閉塞に伴うと思われる透水係数の現象が見られるが、以後の降圧、上昇過程では透水係数の変化は弾

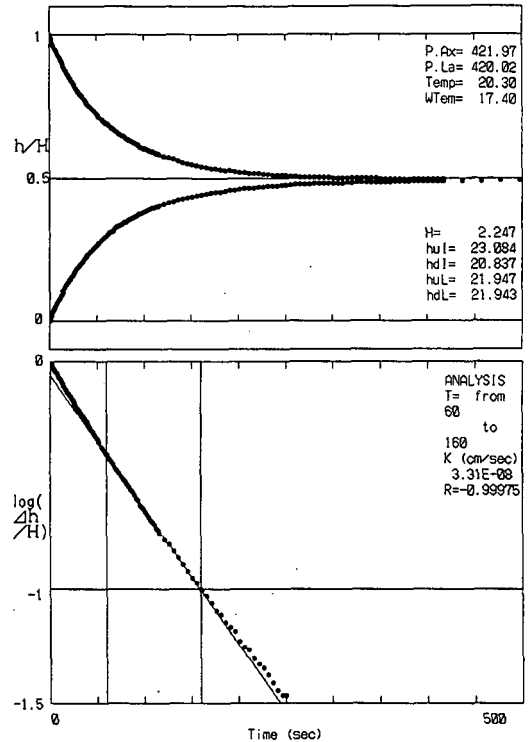


図-3 計測結果及び解析結果例

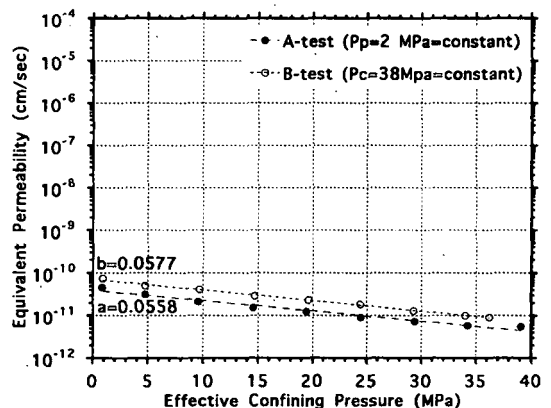
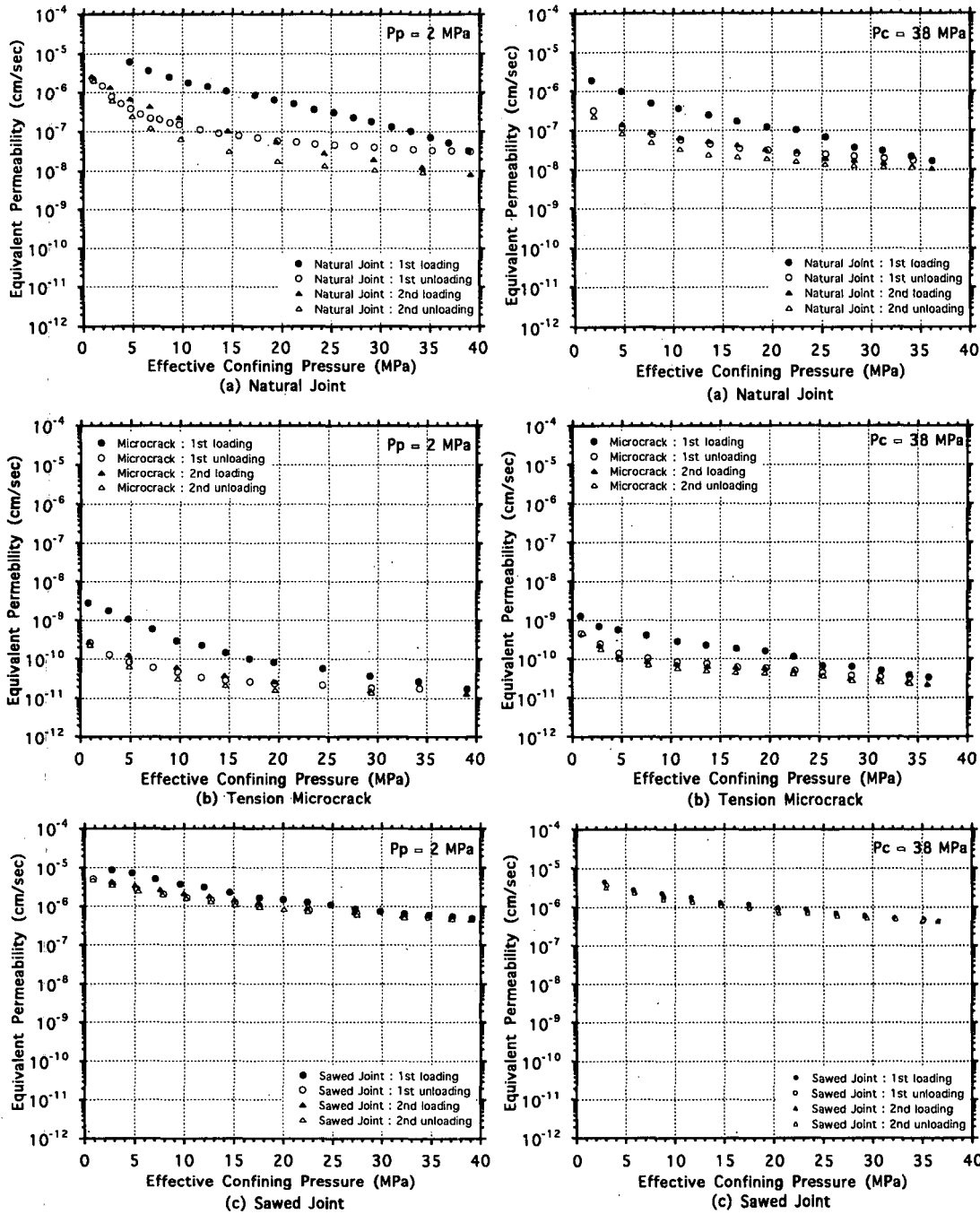


図-4 母岩の透水係数の変化

性的となる。切断亀裂の場合は、ヒステリシスは最も小さく、特にB-testの場合には、初期の段階からほぼ弾性的な挙動を示した。本亀裂表面はかなり細かく研磨されているため、初期昇圧の段階で他の亀裂に見られるマッチングに伴う亀裂内間隙構造の変化が小さかったためと考えられる。また接触面積も最も大きいことが予測され、亀裂自体の変形性が低く、亀裂内間隙構造も変化する難いため40 MPaまでの有効封圧変化での等価透水係数の変化が小さなものになっているものと考えられる。全ての亀裂で封圧の影響の方が間隙水圧より大きな結果となっている。



図－5 亀裂の等価透水係数の変化 (A-test)

図－6 亀裂の等価透水係数の変化 (B-test)

4. 考察

図-5に示された3種類の亀裂に対するA-testの結果より、等価透水係数の有効封圧依存性を検討するため、各試験ステップ間における等価透水係数の対数値の変化率（a値）を算定し、図-7に示した。亀裂における変化率は、母岩の場合と異なり一定とはならず大きな応力依存性及び応力履歴依存性を示した。特に自然亀裂と圧裂引っぱり亀裂の場合に明瞭であるが、降圧時の変化が昇圧時より大きいのは興味深い結果である。また最初の昇圧で亀裂が閉塞した後は、高拘束圧下（10MPa以上）では、a値は母岩の値より小さく、35MPa以上では母岩の1/5以下となりほぼ一定値になる。つまりこの状態では亀裂の変形状態がほぼ定常的となり、これ以上封圧を増加させても変形の起こらない所謂最大閉塞の状態になっているものと考えられる。ただし母岩よりまだ高い透水性を示していることからすると、Iwai⁽¹³⁾の提示した残留開口幅（Residual Aperture）の存在を明示しているものとも考えることもできる。本論文では言及しなかったものの、B-testの結果に基づく等価透水係数の対数値の変化率（b値）についても、図-6の結果より明らかなように、亀裂における変化率は、母岩の場合と異なり有効封圧に対して一定とはならず、a値程ではないが、大きな応力依存性及び応力履歴依存性を示した。

5. まとめ

本研究においては、3種類の異なった亀裂に対して、高精度トランジェントパルス透水試験専用機を用い、有効封圧を上昇・下降させる試験を繰返し実施し、単一亀裂の透水特性の応力依存性を調べた。今後は、亀裂内の接触状態を調べる方法、変形特性、幾何学特性の評価方法と併せた検討を重ね、単一亀裂の透水特性の評価手法の確立を目指して研究を進めていく所存である。

謝辞：産業用X線CTスキャナーによる岩石亀裂同定計測にご協力頂いた、（株）東芝府中工場メカトロニクス技術部の方々には謝意を表します。

参考文献）1) Bernabe Y. (1986), Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.23, No.3, pp.267-275 2) Zoback M.D. and Blerlee J.D. (1975), Ame. Assoc. Petrol. Geol., pp.154-158 3) Walsh J.B. and Brace W.F. (1984), J.G.R., Vol.89, No.B11, pp.9425-9431 4) 高橋他(1990), 応用地質 3 1巻3号, pp.1-10 5) 高橋他(1994), 第9回国内シンポジウム, pp.515-520 6) Iwano M. and Einstein H.H. (1995), 8th ISRM Congress (to be published) 7) Brace W.F. et al. (1968), J.G.R. Vol.73 (6) pp. 2225-2236 8) 青木他 (1994), 土木学会第49回年次学術講演会 9) Krantz R.I. et al. (1979) Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.16, pp.225-234 10) 高橋他(1989), 地質ニュース421号 pp.46-54 11) Tsang Y.W. (1992) W.R.R. Vol.28(5) pp.1451-1455 12) Walsh J.B. (1981) Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol.18, pp.429-435 13) Iwai K. (1976) Ph.D Dissertation, 208 pp., Berkeley, California

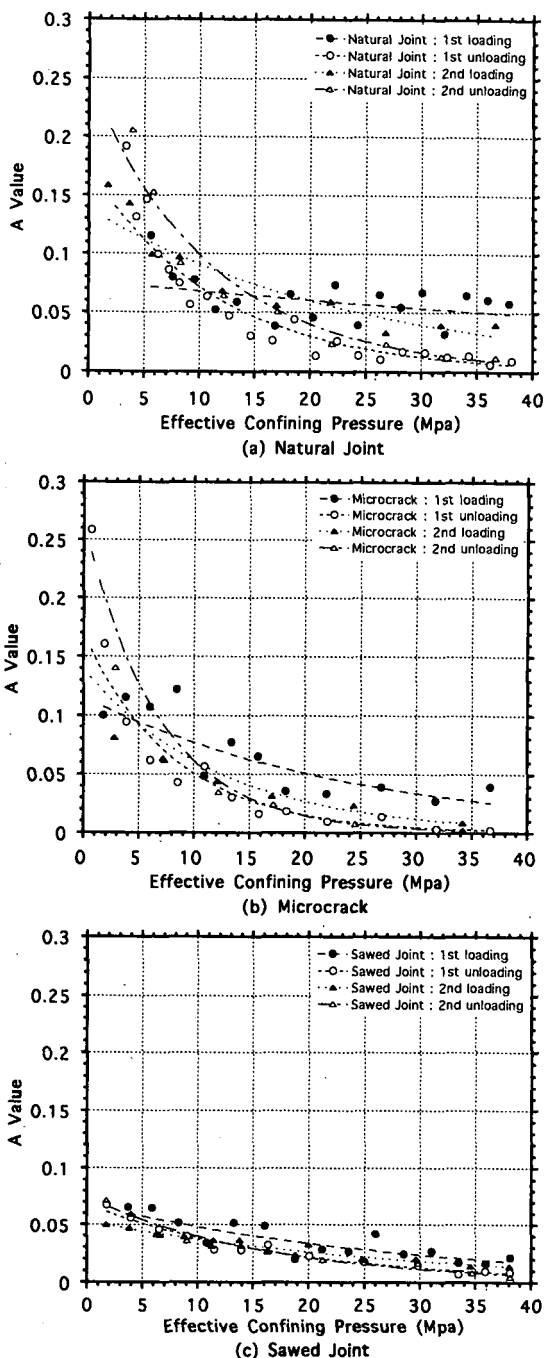


図-7 亀裂のa値の変化 (A-test)