

(79) 稲田花崗岩における透水係数の異方性について

地質調査所 高橋 学
北大工学部 平田 実雄

Permeability Anisotropy on Inada Granite

Geological Survey of Japan Manabu Takahashi
Faculty of Engineering, Hokkaido University Atsuo Hirata

Abstract

The permeability of Inada granite was measured as a function of effective confining pressure for the direction of three preexisting preferred orientations which cause the most easily splitting "Rift Plane" and more splitting "Grain Plane" and less splitting "Hardway Plane". A transient method essentially reported by Brace et al. (1968) was used here. The specimen was a precisely ground right cylinder of Inada granite that was 30mm diameter and 80mm long. High and low pressure reservoirs were almost same volume of 1000cm³. Confining pressure was kept constant of 10 MPa and 20MPa.

The permeability measured with viton sleeve jacket was slightly larger than that measured with two types of silicon rubber jacket. The pressure pulse of 1MPa below did not influence the permeability. The permeability decreased markedly with increasing effective confining pressure. Systematic permeability difference due to the preexisting preferred orientations was not observed during these experiment, but relative relation on permeability between Rift plane and Grain plane as well as on tensile strength and P wave velocity was obtained.

1. はじめに

岩石の透水係数を測定する上で、Brace et al. (1968)によるトランジェント・パルス法（以下、パルス法と略す）の提唱は実験時間の短縮、実験の簡略化、実験精度の向上及びナノダルシー（ 10^{-9} darcy = 10^{-21} m² = 10^{-12} cm/sec）オーダーのいわゆる難透水性岩石の透水係数の測定を可能にした。これは岩石供試体の1端にパルス圧を与えこのパルス圧の時間変化を測定することにより、岩石供試体の透水係数を得る方法である。パルス法による岩石の透水係数の測定方法は米国においてはほぼ確立した調査手法となっており、現在では、温度 [Potter (1978), Summers (1978), Casse and Ramey (1979)] や圧力 [Zoback and Byerlee (1976a, b), Witherspoon (1977), Brace (1978)] などのより複雑な連成問題の実験的解明へと進んで来ている。一方、我が国においてはパルス法を用いた透水係数の測定例は極わずかである [杉本他 (1985), 奥野・斎藤 (1986), 斎藤・奥野 (1987)]。

そこで、筆者らは稲田花崗岩を供試岩石としてパルス法を用いて透水係数を測定した。稲田花崗岩には相直交する三つの潜在亀裂面が存在するので、この亀裂面毎に透水係数が異なるか否かを検討した。また、パルス法に関する実験手法上の基礎的な項目に関しても、従来までの論文の中では明確にされていなかったの、検討を加えた。

2・実験方法
〈潜在亀裂面について〉

一般的に、花崗岩にはほぼ直交する三つの卓越した潜在亀裂面が存在することが知られている。これらは採石場切り出しの際に重要な役割を果たし、各々の卓越方向は日本では割れ易い順に目（一番）、二番、重ね（しわ、三番）などと呼ばれている。外国においてもRift plane, Grain plane, Hardway planeなどと呼ばれている（工藤他(1986a)）。ここでは、工藤他(1986a)の提唱に従い、割れ易い順にRift, Grain, Hardway planeと呼ぶことにする。透水係数の測定にはこの様に潜在亀裂面の方向がはっきりと確認されたブロックを用い、各潜在亀裂面から円柱状の供試体（ $\phi 30 \times 60 \text{mm}$ ）をコア抜きし、整形した。本文では、Rift, Grain, Hardway planeが供試体の長軸と直交するものを各々IGR, IGG, IGHとよぶことにする（図-2参照）。各潜在亀裂面の長軸方向の弾性波速度の結果を図-1に示す。若干のばらつきはあるものの、Rift, Grain, Hardway planeに直交する方向で速度が早くなっている事が認められる。実験では、これらの各潜在亀裂面の透水性の異方性を明らかにするために、弾性波速度値を参考にして各供試体を選んだ。

〈パルス法の原理〉

図-3はパルス法の原理を示したものである。試験装置系（貯留槽、配管系、岩石供試体）はある任意の間隙水圧 P_0 に設定される。この状態から時刻 t_0 において瞬間的に岩石供試体の一端にパルス圧 Δp を加える。この時の高圧側の圧力及び体積を P_1, V_1 低圧側を P_2, V_2 と定義する。更に、高圧側・低圧側がある時間後に収束した時の圧力を P_f とする。実験は高圧側の減衰（ $P_1 - P_f$ ）を測定し、（ $P_1 - P_f$ ）と時間との関係から供試岩石の透水係数を求めれば良いことになる。その際、多孔質媒体を流れる圧縮流体の1次元流れに関する方程式を解くことになる。

〈透水係数の算出〉

トランジェントパルス法には上述した方程式の解き方によって以下の二つの方法が存在する。

- 1) Hsieh et al.(1981)による厳密解
- 2) Brace et al.(1968)による近似解

Hsieh et al.による厳密解では岩石供試体内の流体の貯留量（すなわち、空隙率に相当する）を考慮している。従って、透水係数を精度良く求めるためには、貯留槽内の貯留量を岩石供試体の流体の貯留量と等しくなるように設定する必要がある。一方、Brace et al.による近似解では以下の様な仮定を用いている。

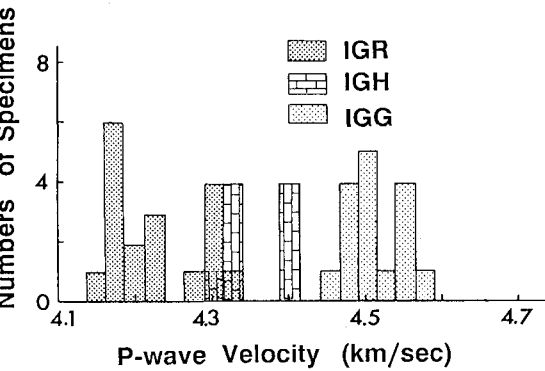


図-1 各供試体の弾性波速度分布

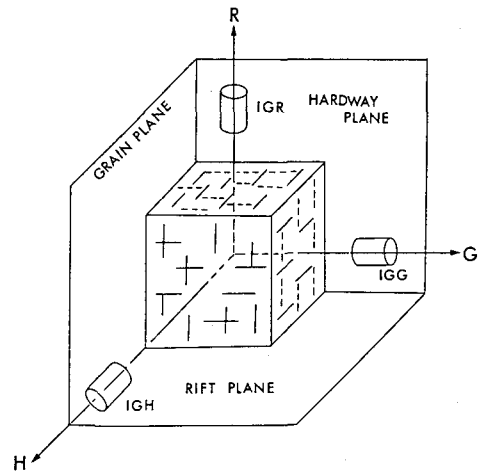


図-2 潜在亀裂面と供試体（IGR, IGG, IGH）との関係

- ① 岩石は多孔質媒体
- ② 岩石の空隙率は貯留槽に比べ十分小さい
- ③ 流体の圧縮率は岩石及び岩石マトリックスのそれに比べ十分大きい
- ④ 供試岩石内の圧力勾配は一定である

さて、今回採用した稲田花崗岩の大気圧下における空隙率は約0.6%であり、貯留槽に対する比は 2.5×10^{-4} となる。また、高圧側と低圧側の貯留槽の体積比も1.00 となる。以上の点から、ここではBrace等による近似解に基づいて透水係数を算出した。

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{\mu \beta}{K} \left[\frac{\beta_{eff} - \beta_s}{\beta} + \eta \left(1 - \frac{\beta_s}{\beta} \right) \right] \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right)$$

μ : 流体の粘性係数
 β : 流体の圧縮率
 η : 岩石の空隙率

β_{eff} : 岩石全体の圧縮率
 β_s : 岩石のマトリックス部の圧縮率
 k : 岩石の透水係数

3・実験結果

〈透水係数に及ぼすJacketの影響〉

パルス法で透水係数を求める場合、通常メタル製あるいはゴム製のスリーブが用いられる、ところが、どちらのスリーブを用いて封圧媒体の供試体への浸透を防いでも、供試体とスリーブとの間を流体が流れるのではないかという疑問が残る。そこで、通常のバイトンスリーブを用いた場合とシリコンゴムを直接供試体に塗布した場合とで、透水係数にどのような影響が現れるかを検討した。バイトンスリーブは内径30mm、外径36mmのものである。シリコンゴムによる被覆は以下のように行った。まず最初に、粘性の比較的低いシリコンゴム（信越シリコン KE-45-TS）を筆を用いて供試体表面にむらなく数十回程度繰り返し塗布する。これが完全に乾いた後に更に、シリコンゴム（信越シリコンシーラント45クリアー）を厚さが5mm程度になるまで塗る。図-4はその結果を示したものである。用いた供試体はIGR-12, IGR-15であり、封圧は20MPaである。いずれの有効応力においてもバイトンスリーブの方がシリコンゴムよりも透水係数が大きい。これは有効圧が0.5MPa以上あればスリーブを用いた場合でも供試体側面を間隙流体が流れることはないと言われているが(1968)、実際には僅かながら供試体側面を間隙流体が流れていることを示しているものと考えられる。

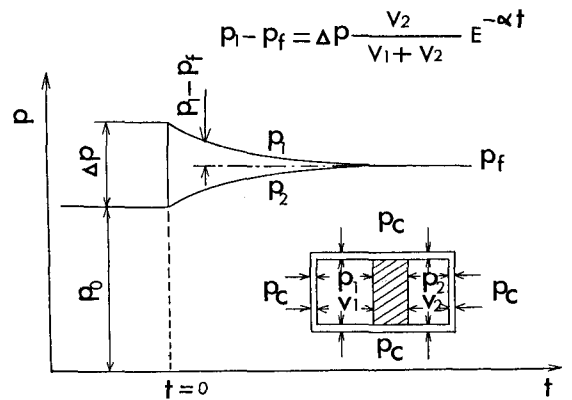


図-3 パルス法の原理

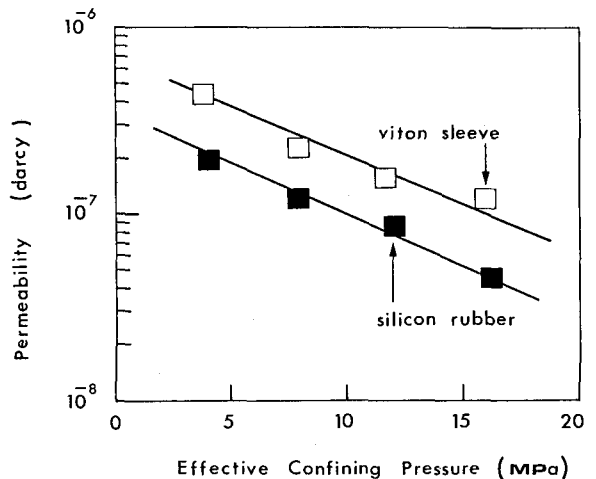


図-4 透水係数に及ぼすJacketの違い

〈透水係数に及ぼすパルス圧の影響〉

杉本他(1985)は稲田花崗岩や萩野凝灰岩について1MPaから5MPaまでのパルス圧の影響を検討し、パルス圧の増加に伴い透水係数が大きくなることを報告している。ここでは、より小さなパルス圧において透水係数に及ぼす影響を調べるために、パルス圧を0.1MPa, 0.5MPa, 1MPaの三段階に設定し検討を加えた。用いた供試体はIGR-3, IGR-4, IGR-5であり、封圧は10MPa一定とした。図-5は結果の一例を示したものである。供試体IGR-5の場合、有効封圧5MPaのもとでパルス圧を1MPa, 0.1MPaと続けて測定し、有効間隙圧を2MPaまで減少させた後、再び5MPaまで増加して測定した。有効封圧5MPaのもとで実施したところいずれのパルス圧においてもほぼ一定の透水係数の値を示した。以上の結果から、パルス圧が1MPa以下ではパルス圧の変化による透水係数の変化は確認されなかった。

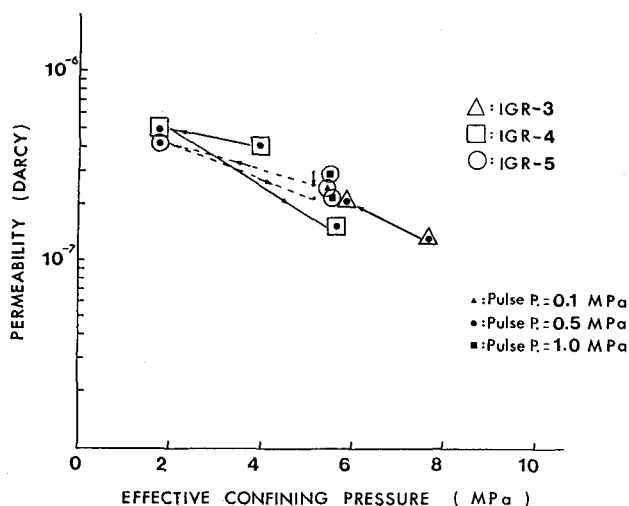


図-5 透水係数に及ぼすパルス圧の影響

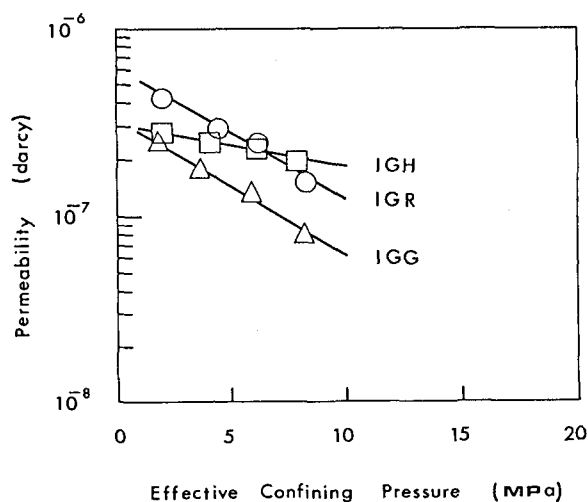


図-6 透水係数に及ぼす有効封圧の影響
- 封圧10MPaの場合 -

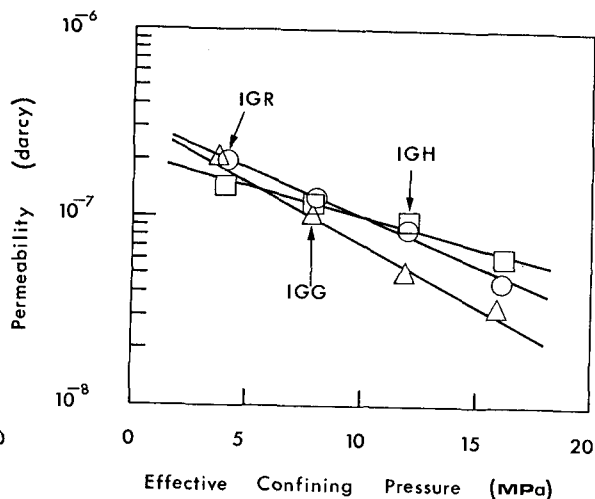


図-7 透水係数に及ぼす有効封圧の影響
- 封圧20MPaの場合 -

〈透水係数に及ぼす有効封圧の影響〉

図-6, 7は封圧がそれぞれ10MPa, 20MPaにおける透水係数に及ぼす有効封圧の影響を示したものである。いずれの潜在亀裂の方向においても、またいずれの封圧下においても透水係数は有効封圧の増加と共に減少している。各潜在亀裂方向毎に透水係数に及ぼす有効封圧の影響の度合を調べてみると、封圧10MPaの場合、

IGRとIGGはほぼ同じ傾きを示しているが、IGHはやや傾きが小さく、IGRおよびIGGと交差する形になっている。この傾向は封圧が20MPaにおいても同様に認められる。但し、封圧が20MPaの方が各潜在亀裂方向毎の差が小さくなっているようである。これは透水係数に及ぼす封圧の影響と考えられるし、封圧を大きくすると変形特性における潜在亀裂による異方性がなくなること（佐野他(1987)）と調和する。さて、実験前の各供試体の弾性波速度の測定結果（速度の速い順にHardway, Grain, Rift plane）は圧列引張試験結果（強度はHardway, Grain, Rift planeの順に小さくなる）から予想できるように、透水係数においてもこれらの関係が成立し、Rift, Grain, Hardway planeの順に透水係数が小さくなるのではないかと期待した。しかしながら、実験結果はこの様な系統的な関係が成立しなかった。但し、いづれの封圧及び有効封圧においてもIGRはIGGよりも大きい透水係数を示している。この様な他の力学試験（工藤他(1986b)）から予想されるような系統的な変化を示さない原因が実験精度にあるのか、あるいは岩石本来の性質に由来し、力学試験結果を決定付ける因子とは別な因子に規制されているのかは、今回用いた供試体と同一のブロックからコア抜きした供試体を用いて、しかも同一の条件で実施し検討しなければならない。

4・まとめ

トランジェント・パルス法を用いて岩石の透水係数を測定した。その際、現在まで明確にされていなかったJacketの影響、パルス圧の影響をまず最初に確認した。その後、稲田花崗岩を用いて各潜在亀裂方向（Rift, Grain, Hardway plane）毎に透水係数を測定した。その結果、以下の事が明かとなった。ゴムスリーブによる被覆ではかなり微少ではあるが供試体とスリーブとの間を流体が流れる。従って、より正確な透水係数を得る場合には供試体側面に完全密着するシリコンゴム等を用いるべきである。パルス圧が1MPa以下では透水係数はパルス圧の影響を受けず一定である。また、稲田花崗岩の透水係数は封圧や潜在亀裂の方向によらず有効封圧の増加と共に減少する。各潜在亀裂方向における透水係数の系統的な変化は確認されなかったが、Rift planeとGrain planeとの間には弾性波速度や圧裂引張強度で得られるのと同じ関係が得られた。

【謝辞】

トランジェント・パルス法の測定方法では（株）清水建設技術研究所 斎藤 章氏及びLos Alamos National Laboratory Dr.Kranzに細かなノウハウについて教えていただいた。記して感謝する。

【参考文献】

- Brace, W.F.: PAGEOPH, Vol.116, pp.627-633, 1978.
Brace, W.F., Walsh, J.B., and Frangos, W.T.: J.Geophys.Res, Vol.73, No.6, pp.2225-2236, 1968.
Casse, F.J. and Ramey, H.J., Jr.: J.Petroleum.Techn, Vol.31, No.8, pp.1051-1059, 1979.
Hsieh, P., et al.: Int.J.Rock.Mech.Mini.Sci, Vol.18, pp.245-252, 1981.
工藤洋三、橋本堅一、佐野修、中川浩二：土と基礎 Vol.34, No.8, pp.47-51, 1986a.
工藤洋三、橋本堅一、佐野修、中川浩二：土木学会論文集 第370号, pp.189-198, 1986b.
奥野哲夫、斎藤章：第18回岩盤力学シンポジウム, pp.381-385, 1986.
Potter, J.M.: Los Alamos Scientific Laboratory, Thesis LA-7224-T, UC-11, 1978.
斎藤章、奥野哲夫：第19回岩盤力学シンポジウム, pp.196-200, 1987.
佐野修、工藤洋三、古川浩平、中川浩二：第19回岩盤力学シンポジウム, pp.1-5, 1987.
杉本文男、松木浩二、遠藤修：応用地質, 26巻3号, pp.11-18, 1985.
Summers, R., Winkler, K., and Byerlee, J.D.: J.Geophys.Res, Vol.83, pp.339-344, 1978.
Witherspoon, P.A., Gale, J.E.: Engineering Geology, Vol.11, pp.23-55, 1977.
Zoback, M.D., Byerlee, J.D.: Int.J.Rock.Mech.Mini.Sci, Vol.13, pp.291-294, 1978a.
Zoback, M.D., Byerlee, J.D.: Ame.Asso.Pet.Geo.Bul, Vol.60, pp.1531-1542, 1978b.