花崗岩中の割れ目の透水係数と有効弾性

Permeability and poroelasticity of fractured granites

清水 以知子[1]，大西 セリア 智恵美[2]，上原 真一[3]，溝口 一生[4]，嶋本 利彦[3]
Ichiko Shimizu[1], Celia Tiemi Onishi[2], Shin-ichi Uehara[3], Kazuo Mizoguchi[3], Toshihiko Shimamoto[4]

[1] 東大・理・地質，[2] 東濃地科学センター(JNC)，[3] 京大・院・理・地鉱，[4] 京大・理・地球惑星
[1] Geological Inst., Univ. Tokyo, [2] TGC-JNC, [3] Earth and Planetary Sci., Kyoto Univ, [4] Dept. of Geol. & Mineral., Graduate School of Science, Kyoto Univ.

地下深部における透水係数（permeability）と間隙構造の関係を調べるために，岐阜県土岐市に分布する白亜紀花崗岩（土岐花崗岩）のボーリングコア試料を解析した。コアは約 700 m の深度で逆断層（月吉断層）を貫いている。解析した試料は母岩の新鮮な黒雲母花崗岩から断層周囲のフラクチャー帯・断層中軸部の面状カタクレーサイト（foliated cataclasite）まで，様々な程度に破砕されている。

透水係数は京都大学のガス圧３軸試験機によって測定した。実験には直径 20-25 mm，長さ 10-40mm に成形した円柱状試料を用いた。測定は室温下で行ない、間隙流体には窒素ガスを用いた。封圧 Pc が小さい(5〜10MPa) 領域の透水係数は定圧流量法によって行ない、これより有効圧が高い領域の計測には間隙圧振動法を用いた。振動法では上流側リザーバの間隙圧を 20MPa 付近で振動させるとともに，封圧を 25〜200 MPa の範囲で変化させた。

すべての実験において，透水係数(この場合、ガス透過係数)は有効圧 Pe の上昇とともに急激に低下し，最高圧力付近では定常値に近づく．減圧パスでは透水係数は恢復するがヒステリシスがみられた．アスペリティを考慮した割れ目の弾性変形についての理論から，透水係数 k の３分の１乗が log Pe に比例するモデルが提案されている（Walsh，1981）が，今回の結果にはあまり適合しない．測定データはむしろ、増圧パス／減圧パスとも log-log プロットで直線上にのる。すなわち k と Pe はベキ状則 k ∝ Pe^(-b) の関係で表わされ、ベキ指数は増圧パスではおよそ -2、減圧パスでは-1 である。両者の違いは割れ目が閉じる際の非可逆的な変形を表す。

間隙圧振動法では透水係数とともに貯留係数が求まり、高圧下での間隙率を見積もることが可能だが、今回の実験では十分な測定精度が得られなかった。そのかわりに、封圧変化に対する間隙圧の応答から間隙の変形挙動を推定した。封圧を増加（減少）させたときには、下流リザーバの間隙圧はスパイク状に上昇（下降）したあと、徐々に一定値に緩和する。最初の急激な間隙圧変化は間隙（割れ目）の準弾性的な変形を表わし、緩和過程は浸透流による圧力勾配の解消によって説明できる。間隙圧変化から求めた花崗岩（結晶ー間隙流体系）の有効圧縮率は加圧とともに減少し、Pe=180MPa 付近では 10〜15×10^(-5) [1/MPa] と見積もられる。ただし計算において、結晶そのものの体積変化は無視した。有効体積弾性率 K は低圧（Pe = 5Ma）で数 GPa であり、 高圧（Pe = 180MPa）では 10 GPa 程度に増加するが、花崗岩の各構成鉱物の体積弾性率およびその Voigt 平均・Reuss 平均（〜50 GPa）と比べてかなり低い。K の有効圧依存性もまたベキ乗則 K ∝ Pe^(-m) で近似され、m はおよそ 1/2 となる。

透水係数 k と有効弾性率 K はともに間隙の形状変化の影響を受け、上記の結果より、k ∝ K^(b/m) の形で関係づけられる。簡単な層流モデルを考えると、k は間隙の巾の 3 乗に比例する（Kozeny-Carman の式)。割れ目の長さ一定で幅のみが有効圧によって変化するとき、ベキ指数 m は１より大きくなることが期待される。今回の実験結果では m が 1 より小さいことから，割れ目の幅だけでなく、割れ目の接触面積や連結性にも変化があったことが示唆される。