

# 低透水性とその応力影響について

小 鯛 桂 一 (環境地質部)

Keiichi KODAI

## 1. はじめに

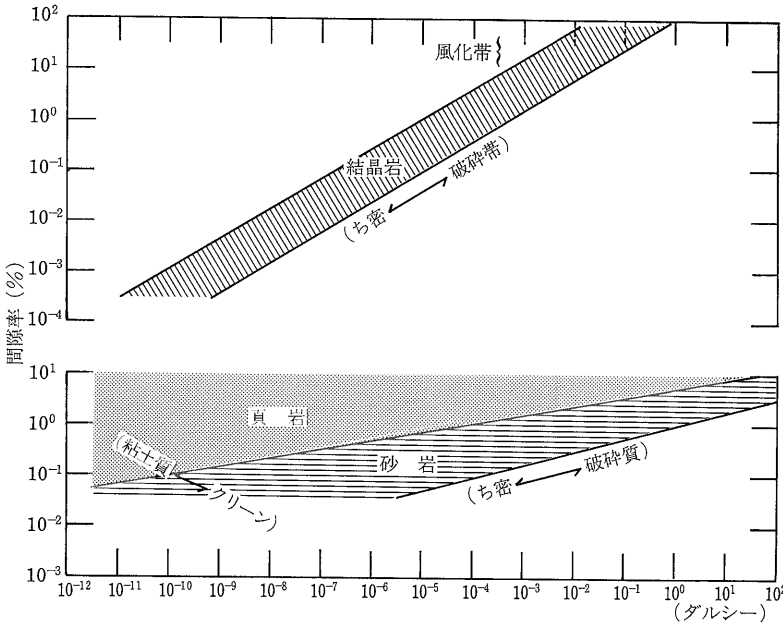
低透水性とは $10^{-8}$ ダルシー以下の透水性層に対する用語である。この低透水性研究は1950年代初 油層工学の基礎研究としてはじめられたが、近時は放射性廃棄物の地下貯蔵技術として行われている。この低透水性層の応力影響については、地下深部で生じる地殻変動や地震動を水理学的にとらえ、これらを予知するのに役立つので強い関心がある。

低い透水係数は普通の野外法である揚水試験で求めることは精度的に難しい。Crook ら (1973) は $10^{-5}$ ~ $4 \times 10^{-4}$ ダルシー範囲の透水性をもつ英国 Cheshire 流域の古生代 Bunter 砂岩を室内と野外の両方で試験した結果、野外の方が1オーダー高いことを示し、 $10^{-5}$ ダルシー位までが揚水試験による透水性測定の限度であるとしている。したがって、さらに低い透水係数を求める野外法としてスワッピング法とトレーサー法があり、 $10^{-7}$ ダルシー位までは問題なく得られるようで Marine (1967) による南カリフォルニア州 Aiken 地域の破碎結

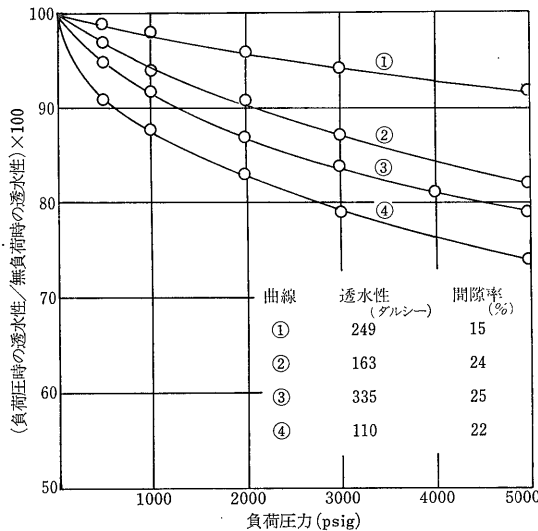
晶岩でスワッピング法と室内コア実験結果の間には差がなかった。最近では Bredehoeft ら (1983) が Cooper のスラグ法を改良して、この改良法がさらに低オーダーの透水性試験に対しても用いられている。とはいえ、非常に深部層は技術的に野外法の実施が困難なので、室内法である高圧下のコア実験に多くを依存して、頁岩の場合のように塑性変化による誤差補正といった問題が派生する。

## 2. 割れ目透水性について

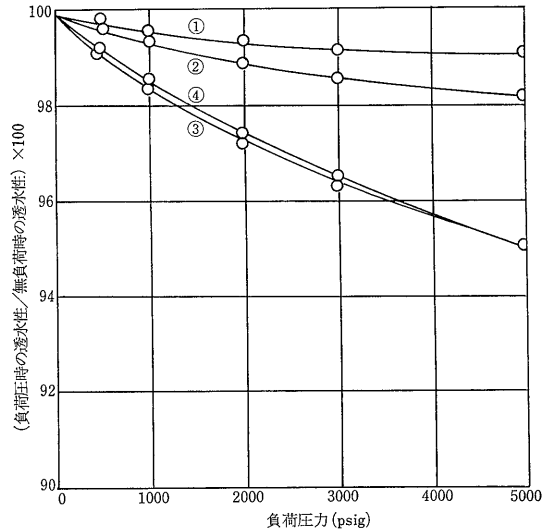
節理や破碎による割れ目は開口幅が1mmを超えることもあるが、一般には0.1mm以下 (Davis; 1966) であるといわれる。Smechow (1961) はソ連 Shnebeliesky の破碎砂岩の割れ目幅が0.1mmのとき、0.85ダルシーになることを試算しており、この程度のたった1つの割れ目でも十分な透水性をもつといえる。本誌の371号中に記したように、個々の割れ目の透水性を算定するのに、割れ目幅を $2b$ とする  $k=(2b)^2/12$  (単位;  $L^2$ ) なる平行平板間流式が用いられる。節理に沿ってできた個々の割れ目は地層の自重圧に関係して深度が大き



第1図  
両対数グラフ上に描いた結晶岩と粒状堆積岩の透水性—空隙率関係図。



第2図 負荷圧時の透水性と間隙率の変化。(Fatt; 1953による)



ほど閉じる傾向がある。節理形成のための応力は大深度まで及ぶとみられるのに 多くの節理は深度増大にしたがって減少し 実際上数100m程度の深さまでしか開口していない (Jahns; 1943) といわれる。したがって透水性もこれと比例的に深度増と共に減少 (後述の第1図からも知れるように指数的) するとみてよい。

### 3. 低透水性—間隙率の関係図とその解釈

地質調査所月報の35巻9号で報告した『岩盤透水性のグラフ表示』において 透水性と間隙率が知られる既存の各種岩石データを集め 岩盤透水性の全体像を系統的・概念的に把握するためグラフ化している。

これらのグラフ中から 結晶岩と粒状堆積岩の透水性—間隙率の両関係図を基にし これらを低透水性範囲まで拡張すると第1図—上と—下のようになる。

Gloyna & Reynolds (1961) によると 火成岩の間隙率は一般に3%以下であり ち密な場合は1%以下を示すという。これらの間隙は内部連結性を欠いたため有効間隙率はさらに縮小するので 透水性も限りなく零に近づく。したがって 一部の多孔質火成岩を除き また風化や破碎を受けない多くのオリジナル火成岩は固有の鉱物組成の相違によらず低透水性であるが このうちの代表的結晶岩は Brace (1980) によると 0.01%以下の内部結合の間隙率を示すとし これを第1図にあてはめると透水性は $10^{-7}$ — $10^{-8}$ ダルシー範囲になる。

粒状堆積岩は炭酸塩岩を除くと 泥岩 シルト岩と粘土岩を含む広義の頁岩と細粒 中粒と粗粒それぞれの砂岩からなる。無破碎の古期砂岩の透水性が一般に $10^{-3}$

ダルシー以下の値をとると同様に 無破碎頁岩の透水性は深度的に異なる分子構造におもに依存して 少なくとも $10^{-3}$ ダルシー以下の値をとるものとみられる。このように頁岩の透水性上限は結晶岩のそれよりも高いが Brace (1980) は同地域同層準の両者の透水性を比べると 頁岩の方が一般に1—2オーダー低いという。このことから頁岩の透水性範囲の広さがうかがえる。ちなみに彼が示した室内コア実験による無破碎の頁岩と結晶岩の最小透水係数はそれぞれ $10^{-10}$ と $10^{-11}$ ダルシーであった。さらに Mitchel (1976) によると 砂岩でも粘土分を多量に含みしかもち密な砂岩は $10^{-9}$ ダルシーといった低値を示す。

### 4. 低透水性層の応力影響

結晶岩……地下深部での異常な圧力または温度の変化は地層透水性に影響を与える。すなわち 地殻変動によるダイラタンシー作用が微細クラックの発生とこれによる透水性増大をまねくのと同様に 地層温度の上昇は膨張圧を増すことで破碎を促進するため 一般に常温下での透水性よりも高くなる。しかし破碎に至らない段階ではクラックの閉鎖性だけが働らくので透水性は逆に低くなる Heard & Page (1982) は3.5—11.0 MPと31—260°C間で試験した花崗閃緑斑岩の透水性比 ( $k/k_0$ ) が31°Cで1のとき 120°Cで約0.1になることを示した。また Braceら (1968) は花崗岩の透水性試験で10 MP下での $3.5 \times 10^{-7}$ ダルシーと400MP下での $4 \times 10^{-9}$ ダルシーを得た。

砂岩……砂岩間隙率の減少を地質年代的な長期でみれ

ば 間隙水による石英や長石などの鉱物の溶解とこれら  
の間隙内再充填を含めた化学的セメンテーションが主と  
なるが 比較的瞬時の加圧による間隙率の減少率は低く  
一般に無視しうる程度である。これに対して透水性は  
応力や圧力の増加により顕著な低減を示す。Fatt(1953)  
は異なる個所の油層中の砂岩コアについて 加圧状態下  
の透水性と間隙率の関係を調べた。第2図の左は透水  
性 そして右は間隙率 それぞれの加圧下の減少率を示  
す。図左中に示される数値は無負荷時の透水係数と間  
隙率の両値で ①が粗粒砂岩 ③が中粒砂岩そして②と  
④が細粒砂岩に相当するものとみられ いずれも半固結  
性の砂岩と推定されるが 圧力増大に伴う透水性の顕  
著な変化と間隙率の僅かな変化が認められる。Fatt &  
Davis (1952) はまた この加圧を69 MP (10,000psig)  
まで拡張させると透水性がほぼ半減したことを報告して  
いる。

頁岩……Bredehoeft ら (1983) が頁岩の透水性を試験  
した結果は 浅部の  $2 \times 10^{-4}$  ダルシーと深部の  $5 \times 10^{-7}$   
ダルシーであったように 同一地層でも破砕が関係しな  
ければ負荷加重圧の差により透水性も相違してくる。  
しかし頁岩の場合 若い年代の軟質のものの方が塑性大  
で破砕しにくいのに対して 古期の硬質のものの方が破  
砕しやすく透水性を増す傾向にあるため 透水性の年代  
的または深度的な単純比較はできない。

クリーンな砂岩のように初期透水性が高い地層ほど圧  
力による透水性減少率が大きくなる傾向があることは多  
くの報告でみられるところであるが 頁岩のような低透  
水性層ではクリーンな砂岩の場合と逆の傾向 すなわち  
透水性が低いほど加圧による透水性減少率が大きくなる  
ことを McLatchie ら (1958) が指適している。これ  
は前者が高間隙率ほど高透水性であり 後者がその逆  
であるのと相通じるものがある。なお Vairogs ら  
(1971) は圧力による透水性減少率が高透水性層よりも  
低透水性層でより比例性があることを示している。

#### 文 献

- 1) Brace, W. F. (1980) Permeability of crystalline and argillaceous rocks; Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abs., vol. 17, p. 241-251.
- 2) Brace, W. F., Walsh, J. B. and Frangos, W. T. (1968) Permeability of granite under high pressure; J. Geophy. Res., vol. 73, no. 6, p. 2225-2236.
- 3) Bredehoeft, J. D., Neuzil, C. E. and Mily, P. C. D. (1983) Regional flow in the Dakota aquifer; U. S. Geol. Surv., Water Supply Paper, p. 1-45.
- 4) Crook, J. M., Howell, F. T., Woodhead, F. A. and Worthington, P. F. (1973) Permeation properties of Bunter sandstones from the Chesire and Fylde basin; Geotechnique, vol. 23, no. 2, p. 262-665.
- 5) Davis, S. N. (1966) Hydrogeology; Wiley, p. 318-371.
- 6) Fatt, I. (1953) The effect of overburden pressure on relative permeability; Trans. AIME, vol. 198, p. 325-326.
- 7) Fatt, I. and Davis, D. H. (1952) Reduction in permeability with overburden pressure; Trans. AIME, vol. 195, 329p.
- 8) Gloyna, E. F. and Reynolds, T. D. (1961) Permeability measurements of rock salt; J. Geophy. Res., vol. 66, p. 3913-3921.
- 9) Heard, H. C. and Page, L. (1982) Elastic moduli, thermal expansion, and inferred permeability of two granites to 350°C and 55 Megapascals; J. Geophy. Res., vol. 87, no. B 11, p. 9340-9348.
- 10) Jahns, R. H. (1943) Sheet structure in granite, its origin and use as a measure of glacial erosion in New England; J. Geol. vol. 51, p. 76-98.
- 11) 小鯛桂一 (1984) 岩盤透水性のグラフ表示: 地質調査所月報 35巻 9号 419-434頁.
- 12) " (1985) 破砕岩盤の水理解析に関する話題: 地質ニュース 371号 23-27頁.
- 13) Marine, I. W. (1967) Savanna river near Aiken South Carolina; U. S. Geol. Surv., Prof. Paper 575 B, p. B 203-B 211.
- 14) Mitchell, J. K. (1976) Fundamentals of soil behavior; John Wiley, New York, p. 422p.
- 15) Mc Latchie, A. S., Hemstock, R. A. and Yoong, J. W. (1958) The effective compressibility of reservoir rock and its effects on permeability; Trans. AIME, vol. 213, p. 386-388.
- 16) Neuzil, C. E. (1986) Groundwater flow in low permeability environments; Water Resour. Res., vol. 22, no. 8, p. 1163-1196.
- 17) Smechow, E. M. (1961) Development of fracturing in rocks and fractured reservoir capacity; proc VNIRI vol. 172, Gostoptechizat, Leningrad.
- 18) Vairogs, J., Hearm, C. L., Dareing, D. W. and Rhoades, V. W. (1971) Effect of rock stress on gas production from low permeability reservoir; J. Petrol. Tech., Vol. 9, p. 1161~1167