

(3) 地質分離面の分布・性状と透水性 — 花崗岩の例 —

東工学部・小島圭二，三菱鉱業セメント・近藤比呂志，熊谷組・鈴木猛康

花崗岩のような割れ目系岩体を模式的にあらわすと、とくに日本の場合には、表層に厚い風化帯が数10mあるので、図-1のようにあらわすことができる。最上部は風化して粘土化した部分で、花崗岩ではマサメウエと呼ばれる。新移帯は一般に薄く、せいぜい10m程度で、急激に新鮮岩体に移行する場合が多い。この部分は風化による細片化が進み、割れ目が多い。新鮮岩体には、マグマが冷却する時点でできた節理や地殻変動にともなう節理・断層などの地質分離面が存在する。ダム岩盤の力学的性質の表示によく用いられる岩盤分類図で模式的な表現をすると、図中に記号を付けた場所が、それぞれの分類区分A~Dに対応する。透水性はこの新移帯を含む風化帯と、より深度の新鮮岩体とは大きな違いがあり、モデル化の考え方も異なる。例えば、透水係数はこれを境に急激に小さくなり、日本の花崗岩では、地下水位はこの境界部付近に存在することが多い。

風化帯では、粘土化、細片化、およびゆるみによる割れ目の開口、そこへの粘土の流入など、透水性のばらつきは、このような局所的な風化の程度がいに左右される。一帯全体としては、風化度は表層から深部へと小さくなるから、これに応じた透水係数の変化が認められる。これらの状況は、しばしばダムサイトのルジオンマップに認められる。

新鮮岩体では、地下水はもっぱら節理や断層などの地質分離面を通して流れるので、透水性はこのこれらの割れ目面の分布・性状と密接な関連がある。卓越する方向をもった割れ目群がいくつか組合わせた岩体を、割れ目系岩体と呼ぶ。このような岩体では、対象とする構造物や岩掘削の規模(寸法)によって、図中に示すように、それぞれ岩石構成材料としての岩片の規模(Km)、節理系の規模(Kj)、断層の規模(Kf)の違いで透水性が異なる。小規模な構造物では、ある寸法以上の断層は避けて、節理の規模の領域内での設計・施工が可能であり、この場合には、後述するように平均的な透水性によるモデル化が可能である。しかし構造物の規模が大きくなると、断層は避けられず、断層の透水性が著しく大きい場合に

は、地下水流はそれに支配されるので断層と

いう特定の水みちを考慮した、“断層の規模”でのモデル化が必要とらう。

風化帯、新鮮岩体のどれを対象とするかは、構造物の種類・目的によてきまるもので、例えば図中に示したような、構造物それぞれの深さに対する位置づけが考えられる。ここでは、地下貯蔵、放射性廃棄物の地層処分など、地下の新鮮岩体の利用を目的として、比較的深い、低透水性岩体中の地下水流水の解析をおこなう立場から、花崗岩体について割れ目系の性状・分布と透水性との関連性を見出し、モデル化の検討をおこなう。

1. 割れ目系岩体の透水性

割れ目沿いの透水係数Kjは、平行平板間の流れについて、次式で与えられる。

$$K_j = C \frac{8b^2}{12\nu} \dots\dots\dots (1)$$

但しbは、割れ目開口中、 ν は水の動粘性係数、 g は重力の加速度で、Cは節理面の粗度などに関する係数である。また、この割れ目を含む区間Lの岩盤全体としての透水係数は次式で与えられる。

$$K = C \frac{8b^3}{12\nu L} \dots\dots\dots (2)$$

この区間に、bが同じ割れ目がn本あれば、Kはn倍となる。(2)式は、Witherspoon P.A. (1979) などにより、Cubic lawと呼ばれている関係である。

以上の式から、ある卓越割れ目系に関しては、透水係数は割れ目の開口やの影響が大で、また割れ目の密度(または間隔)によっても変化する。割れ目の開口や

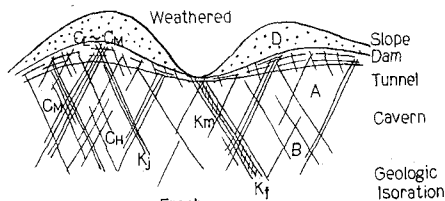


図-1

は、割れ目の粗度や充填物質の有無や性状によって大きくかわるので、その影響は係数Cで表現されている。また実際の岩盤では小さな割れ目は連続性が悪い（長さが小）ので、これも一種の抵抗になるからCの中で表現されることになる。開口やはさらに外的な要因、即ち割れ目に作用する土載圧などの応力によっても変化する。卓越割れ目の透水性は以上のような諸要因が組合さってくる。

実際の岩体では、このような卓越割れ目系が集まった割れ目群の透水性が問題となる。このような三次元的な割れ目系に対しては、上述の平行平板流の近似では当てはまらない場合が多い。しかし岩体中の割れ目が或る程度以上多くなると、扱う岩体の寸法によっては、割れ目の影響が平均化されて、均質な岩体に近い扱いが出来ることも急激的な事実である。例えば石油公団(1981)では、平均割れ目密度2~3本/mの花崗岩体について、5m区間の透水係数 K_i の対数平均

$$K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log K_i \dots \dots \dots (3)$$

を用いた2次元浸透流解析による地下空洞への湧水量の予測値と実測値とが良く一致することを報告している。これは、節理規模の割れ目群では全体としての割れ目の均質化とそれにともなう割れ目系の連続性の増加が1つの大きな要因と考えられる。渡辺(1981)は、岩体中に格子状割れ目系を考え、その出現率と割れ目の連続性の関係をバーコレーションモデルで計算し、格子(割れ目)の連続性は、割れ目の出現率が全体の50%を越えると急増し、従って開口している割れ目では透水性も急増するであろうことを指摘している。これは又割れ目の多い岩体では、岩盤全体の透水係数は、平均的な粒状体のそれと等価な扱いが出来るが、割れ目が少ない岩盤または、"断層の硬塊"の割れ目などでは、割れ目沿いの水みちを考慮した解析が必要になるであろうことを意味している。

2. 岩体中の割れ目の性状と透水性

前章で述べた割れ目の透水性に関する規則性が、実際の岩体についてどこまで当てはまるかを各地の花崗岩体で検討する。

(1) 開口中と透水性——単一割れ目の透水性のばらつきの例

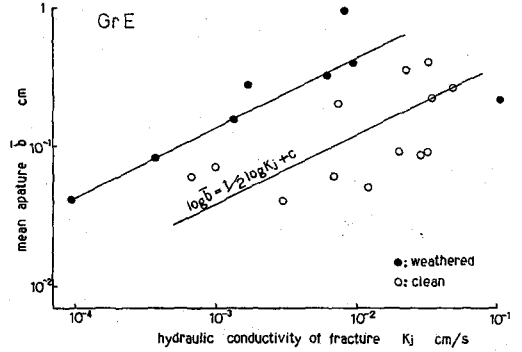


図-2

花崗岩(GrE)の単一割れ目面について、約200m²の面内各所でのボーリング孔内で透水係数を測定し、ボアホールTVによる開口中の計測も含めて、割れ目自体の透水係数 K_f と平均開口中 $\bar{a}$ (ボーリング孔壁一周分の平均)との関係性を求め図-2に示した。これだけの狭い範囲でも透水係数には大きなばらつきがある。とくに黒丸は面が風化し、やゝ粘土化したもので、これとクリーンな割れ目(白丸)とでは透水係数がほぼ1桁異なる。そして、白丸自体も、開口中が変化し、また(1)式に当てはめてみると、測定上のばらつきはあるが、面の性状によりいくつかのグループに分けられようである。

(2) 粘土充填物の影響および深度

図-3は測定区間5m間に粘土のはすみのある割れ目とないものとを区別して、透水係数と深度の関係性をプロットしてある。図中の実線は、室内実験による試料の透水係数の垂直応力による変化を併記したもので、GrA, GrBの花崗岩について野外における透水係数の

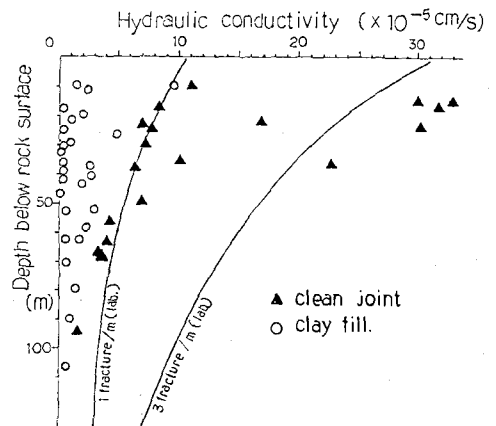


図-3

深度変化の勾配（両対数目盛で）が実験室のそれとはほぼ等しい（近藤・小島（1981））という結果を利用して変化の傾向を示したもので、絶対値には意味はない。両曲線はそれぞれ一定区間に、割れ目本数が1および3の場合を記入したものである。粘土の有無が透水係数に明りように反映されている。

(3) 断層・破砕帯および深度の影響

図-4は、透水試験区間に、断層・破砕帯を含むもの112点、フリーな割れ目327点について、それぞれ深度と透水係数の関係をプロットし、10m毎にそれぞれの透水係数の平均値を算出して図示したものである。この例では、深度との相関および破砕帯の透水係数が大きくなる傾向が見出される。

以上(2),(3)から、それぞれ粘土充填物、断層・破砕帯等の割れ目の性状と透水性の相関を求める上で、割れ目の性状のグループ分けの重要性和これらの要因の影響が大きいことなどが見出された。

(4) 割れ目密度、断層破砕帯と透水性

割れ目密度と透水性の相関は、透水性が割れ目の数の他に、既に述べたような諸要因に影響されるため、単純にプロットしただけでは、一般には何ら相関関係が認められない。これはちょうど、岩盤せん断試験において、同一岩盤等級のもので一連の試験をしう限り、せん断強度で、や内部摩擦角が求められないのに似ている。上記(2),(3)の結果はそれを強く支持するものであり、観察によりほぼ同じ性状の割れ目面の集りと判定され、比較的透水係数が高い（測定精度が良い）範囲では、しばしば両者の間に明りような相関が見出せることもこのような試みの重要性を支持するものである。しかしこのような目的で詳細な計測をしたデータはそれほど多くないので、本論でグループ分けの結果を提唱するのは早計である。一方問題となるのは、割れ目が非常に多く透水性が大きい所であるから、見方をかえて、割れ目密集帯（割れ目が多くコアでは線状となる）または、破砕角硬化した断層が、透水試験区間5m中何mをしめるかで表し、これを累積破砕帯として、透水係数との関係をもめてみた。いうなれば、“断層規模”の寸法で割れ目密度との相関を求めたことになり、コアの観察もやりやすいし、調査の目的にもかなっているといえよう。GrD地域の一例を図-5に示す。

3. 地下水流れによぼす、割れ目の性状の影響度以上の検討結果から、それぞれの割れ目面が、ほぼ同じような性状をもっている岩体では、透水性は割れ目密度または累積破砕帯と深度に相関した或る値が得られ、割れ目の分布・性状を把握することによって、岩体の透水係数分布モデルをより適切に作成できる見通しを得られたといえよう。しかし、現状では、割れ目面の性状と透水性の関係を、明確にとらえたデータが少なく、岩体をモデル化するに当っては、平均的な透水係数を

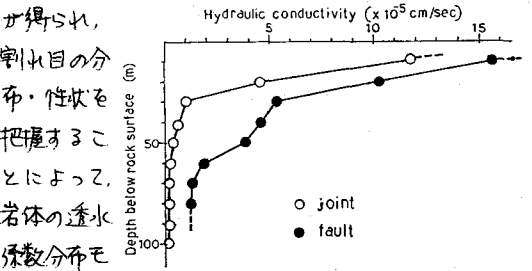


図-4

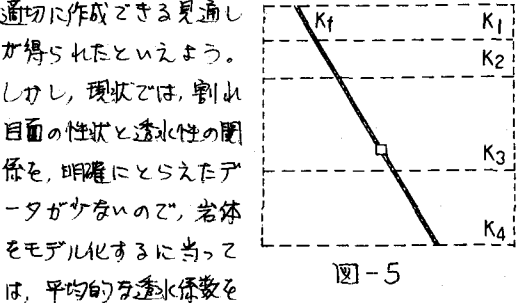


図-5

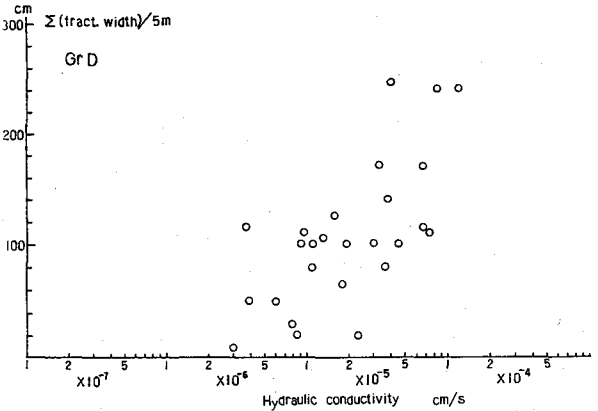


図-6

Cace No.	Kx (cm/s)	Kz (cm/s)	Kf (cm/s)	Q (l/min)
2		1×10^{-6}		0.108
4	5×10^{-7}	5×10^{-6}		0.442
7		1×10^{-6}	1×10^{-5}	0.640
8		1×10^{-6}	1×10^{-4}	5.32

表-1

もろい解析が妥当か否か、どの程度の規模の破砕帯を水みちとして考慮すればよいかの判断を、何かとする必要があるということになる。

前述したように、普通の割れ目密度(数本/m)の所では、節理規模の割れ目の影響は、平均化されて透水係数は、等方均質な対数平均値であらわされると判断される。一方、大きな断層や割れ目密集帯は、多くの場合平均的な透水係数よりはるかに大きな透水性を示すから特異な水みちとして扱う方が妥当であろう。そこで、地質条件によってどれくらい湧水量が変化するかを目安を得るため、図-6に示すような、地下空洞への湧水に関する簡単なモデルを作成し、数値解析をおこなった。

解析に当っては、差分法を用い、地下水位の変動がない定常状態、降雨・不飽和域、空洞周辺のゆるみなどは考えていない。また孔隙率は5%とし、透水係数の入力条件は表-1とした。空洞および破砕帯の規模は、それぞれ5m×5m、2.5m中で計算した。試みに岩体・断層とも等方均質な場合の湧水量Qを表-1に示す。岩体・破砕帯共深度方向に透水係数が変化する場合にはもっと大きな流量を示すが、実際には地域を越えるほど透水性と深度や割れ目密度など地質条件との相関がうすれ、結局は平均的な処理しかできないこと、また断層の厚さの変化等によっても当然湧水量は変化することなどを考えれば、あまり細かい検討は無意味であるので、この程度の例にとどめておく。ここに示した結果は、近く出現する規模の断層をどの程度まで水みちとして考慮すべきかのよりどころを示したにすぎないが、一般に破砕帯の透水係数が周囲より2桁違うと、違いが目立ってくるという。この場合にも均質等方体に比べ、流れが破砕帯に集中し、平均的な流量も1桁大きい結果が得られている。実際の例では、GrB地域では、平均透水係数が 10^{-6} cm/s に対し破砕帯の透水係数を2桁周囲より高くとした予測計算では、ほとんどの水がそこに集中することになるが(鈴木・小島 1981)、実際には透水係数が1桁しか違わなかったことなどにより、断層からの目立った湧水は認められていない。またA鉱山の坑道閉塞プラグ地点では、詳細な透水試験の結果、天盤部5m深までゆるみ領域が発達しており、周囲岩盤の透水係数 10^{-6} cm/s に対し2桁高い値を示すことが見出された。プラグ周辺の湧水状況をFEM解析によりシミュレートした

結果、

アラブ
坑口側
天盤部
からの
湧水量
は、計
算結果
と非常
に近い
一致を
示した。

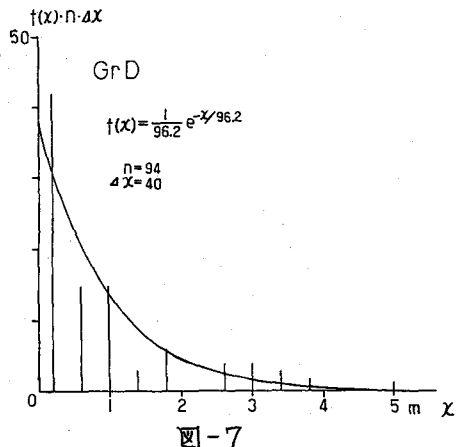


図-7

(鈴木1982) この場合にも2桁の透水係数の差は、明らかな水みちを示しており、平均湧水量は、均質岩体と比べ2桁の差を生じている。

このような事
例が51つの考
え方を追う過程
として、試みに、
透水係数が周囲
の平均値を2桁
越える破砕帯の
累積破砕帯はど
れくらいになる
かを図-5につ
いて検討してみ
るとおよそ4

mと外挿される。水みちとしてはこの程度の厚さがモデル化できればよさそうである。それではこの程度の破砕帯を持つ破砕帯は、どれくらい頻りに出現するかを考察するために、10m間に出現する累積破砕帯の分布を総延長1kmのコアについて2桁刻いた結果、図-7のように指数分布で近似され、図-8の確率分布曲線が得られた。これから前述の破砕帯4mを越える確率を求めると約4%となる。従って10m区間内の累積破砕帯は、これが100集った1kmの規模と考えれば、岩体中には、4箇所程度この規模の破砕帯が存在することが予測される。

あとがき；ここでは、地質分離重の性質分布と透水性の相関について、いくつかの相関の良い例をあげ、モデル化についての基本的な考え方を示すにとどめた。

図-8

(3) INFLUENCE OF DISTRIBUTION AND PROPERTIES OF GEOLOGICAL
DISCONTINUITIES TO THE PERMEABILITY OF GRANITIC ROCKMASS

Keiji KOJIMA University of Tokyo
Hiroshi KONDO Mitsubishi Coal Mine
Takeyasu SUZUKI Kumagai Gumi Co.

The fracture characteristics of granitic rock mass in Japan are described here for the relation of permeability.

Some typical figures are shown in this paper which give the relationship between hydraulic conductivity and some properties of geological discontinuities such as joints and faults. Especially, main flowpath of undergroundwater is in the remarkable fractured zones in rockmass, so it was found that the discontinuities are highly related to the permeability, which are expressed by the cumulative width of fractured zone in each 10 m of cores. And this index for permeability shows negative exponential distribution.

Then the basic conception is discussed for the prediction of fracture distribution in actual rockmass and for making appropriate models to numerical calculation.