

岩盤浸透流における割れ目の確率論的評価

埼玉大学 工学部 正会員 ○ 渡辺邦夫
 " " " 佐藤邦明

はじめに

岩盤浸透流は、岩盤内割れ目を主な経路とする浸透流であり、通常の粒体集合の多孔体浸透流とは異った性質を持っている。たとえばその例として、(1)岩盤割れ目には方向性が顕著であり、岩盤浸透流はかなりの異方性を示す、(2)割れ目相互の脈絡の多少が全体の透水性に大きな影響を持つ、(3)抵抗則が異なる、などが考えられよう。このような性質を踏えて流れをモデル化するためには、まず岩盤割れ目の特性を十分評価する必要があるが、岩盤割れ目は複雑な特性を持っており、この点に関する研究は、従来満足ゆくものであったとは言い難い。今回、筆者らは岩盤割れ目特性のうちで、浸透流に大きな影響を持つと思われる、割れ目幅分布、方向分布、脈絡性について現地実測を行い、それらの定量評価を検討し、岩盤浸透流の性質を二・三考察した。

1 割れ目幅・方向分布を考慮した浸透モデル

岩盤の透水性の評価については、現地実測など種々の方法があるが、その一つに岩盤内に発達する割れ目系を簡単なモデルでおきかえ、透水経路は割れ目のみであるとして、近似的に透水係数を求める方法がある。そのモデルの例として、たとえば図-1(a)、(b)が考えられるであろう。(a)は、岩盤割れ目系を動水勾配 J 方向に平行な N 個の幅 t_i ($T_0 \leq t_i \leq T_A$) を持つ平行板間隙でモデル化したものであり、 T_0 は最小割れ目幅、 T_A は最大割れ目幅である。一方、(b)は平行板間隙が種々の方向に広がっているとしたものである。まず(a)について着目するが、問題となるのは幅 t_i の分布をどのように考えるかであろう。ここで t_i が一定とすれば、従来提唱されている平行間隙モデルとなるが、実際の岩盤割れ目は種々の幅を持っており、その幅分布を導入した方が合理的であろう。筆者らは数種の岩盤で表面にみられる割れ目幅分布を測定しているが、その結果の二例を図-2に示す。図中、(a); 安山岩(竜飛岬付近)、(b); 花崗岩(上松付近)節理の open crack であるが、これらの分布は、割れ目幅 t と $t + \Delta t$ の間にある割れ目数 $N(t) \Delta t$ が、

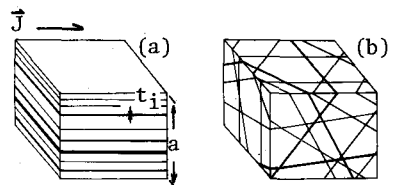


図-1 割れ目系モデル

$$N(t) \Delta t = K T^m \Delta t, \quad (K, m \text{ は定数}) \dots\dots(1)$$

で近似的にあらわしうることを示している。それぞれの場合の Δt , m の値は図中に付記した。また Ogata¹⁾ は、日本各地のダム周辺岩盤中にみられる破碎帯幅分布を報告し、同様な分布となることを報告している。分布がこのように仮定できれば、全体の透水係数 k は、層流状態における平行板間隙の粘性流れの式より、

$$k = \frac{1}{a} \int_{T_0}^{T_A} K \cdot \frac{g}{12\nu} t^{-m+3} dt = \frac{1}{a} \frac{gK}{12\nu(-m+4)} (T_A^{-m+4} - T_0^{-m+4}) \dots\dots(2)$$

と近似的にかける。ここで a は図-1(a)に示したように、岩盤の J 方向に垂直な辺長であり、 g は重力加速度、 ν は水の動粘性係数である。

以上のように、モデル(a)の透水係数が評価できれば、その結果をモデル(b)にも応用することができる。最近 Rocha ら²⁾ は、

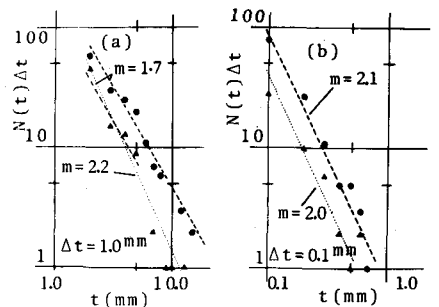


図-2 割れ目幅分布の実測結果

(a); 安山岩節理(青森県竜飛岬)
 (b); 花崗岩節理(長野県上松)

ある方向の割れ目の透水係数が $k^{(n)}$, 動水勾配が \vec{j} (i, j, l) であった時、この割れ目による浸透流速ベクトル \vec{v} (u, v, w) が、割れ目の方向にのみ関係する対称透水テンソル $\parallel K_n \parallel$ によって、

$$\vec{v} = \parallel K_n \parallel \cdot \vec{j} \quad \dots\dots(3)$$

となることを示した。さらに、種々の方向を持つすべての割れ目による全体の透水テンソル $\parallel K \parallel$ を

$$\parallel K \parallel = \parallel K_1 \parallel + \parallel K_2 \parallel + \dots, \dots\dots(4)$$

とあらわした。この透水テンソルにより岩盤の透水性が評価できるが、その個有値、個有ベクトルを考えれば、それらは最大、中間、最小透水係数 (k_1, k_2, k_3) 値、およびその方向に対応させうるから、岩盤の透水異方性を評価することができる。筆者ら³⁾は、一般的に走向傾斜表示された割れ目方向を使って、透水テンソルを求める手法を報告しているが、実際に計算された例を図-3に示す。図中(a)・(b)は共に青函トンネル坑内の実測結果であり、上図は割れ目方向をシュミットネットに投影したもので、卓越方向を●で示した。この卓越方向を用い、各方向で割れ目透水係数 $k^{(n)}$ がすべて一定と仮定して、最大、中間、最小透水係数、およびその方向を計算したものが下図である。下図の大円は用いた卓越割れ目、●は k_1, k_2, k_3 方向をあらわしている。この結果、 k_1, k_2, k_3 方向はそれぞれほぼ、鉛直方向、NS方向、EW方向であり、また異方性の程度を k_1/k_3 であらわせば、その値は3~5程度である。しかし、 $k^{(n)}$ 値は実際には各方向により異なり、 k_1/k_3 値はさらに大きくなることも十分考えられる。以上のように、岩盤割れ目系が、図-1(a)・(b)のようにモデル化しうれば、透水性を評価することができる。

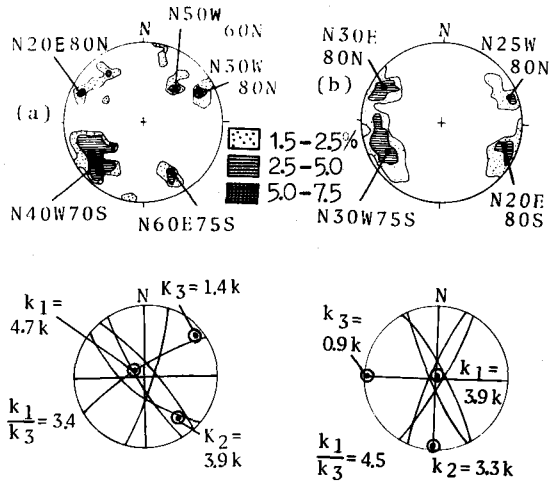


図-3 実際の割れ目方向分布 (上図) と透水係数の異方性 (下図)、(青函トンネル吉岡方)

2 岩盤割れ目の連続性の評価

1で述べたモデル化の問題の一つは、各割れ目の広がり、考えている岩盤の大きさに比べて十分大きいと仮定することであろう。つまり、ある大きさの岩盤について、割れ目は一つの面から他の面に \vec{j} 方向につながっているとしている。しかし、実際の岩盤ではこのような仮定を吟味してみる必要がある。実際の岩盤割れ目を二次元的に考えると、図-4のa,b,c,d,eのようなモデルが想定しえよう。いま図中A A'からB B'に至る浸透流があれば、浸透経路となりうるのはa,d,eのみであり、b,cは途中で切れており経路となり得ない。また経路となり得るものも、種々の方向の割れ目が相互に連結していることが一般的で、必ずしも一方向に伸びてはいない。岩盤浸透流を考える場合、このような途中で切れたり、あるいは相互に連結したりする割れ目の性質(連続性)を考える必要がある。この連続性を考えるにあたって、まず各割れ目を長さ l_0 の小割れ目(以下単位割れ目と名づける)で分割する。さらに各単位割れ目に、A A'から順次0,1,2...と段階数をつけると、浸透経路となりうるa,d,eではそれぞれ8,8,7段階までの単位割れ目連続がみられることとなる。このことは、逆に言えば、それだけの段階数、単位割れ目が連続していなければ、浸透経路となり得ないことを示している。

2 岩盤割れ目の連続性の評価

この浸透経路となるに必要な段階数は、割れ目によって異なるが、一つの岩盤について、平均的に \bar{n} であったとする。いま、0段階の単位割れ目が x_0 個あったとして、このうち何個が浸透経路となりうるに必要な \bar{n} 段階の連結を持つであろうか。この問題は、図-4 aのように、途中で割れ目が閉ループを持たない場合は

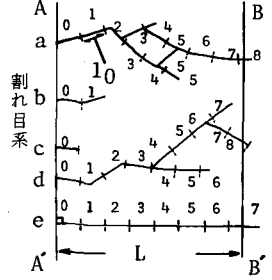


図-4 割れ目連続モデル

、確率過程、特に分枝過程の理論によって評価しうる。この理論を、割れ目連続性の評価に応用するにあたって、まず、1つの単位割れ目に連結する次段階の割れ目数をYとして、それが確率分布

$$P(Y=j) = \mu_j, (j=1, 2, 3, \dots), \dots\dots(4)$$

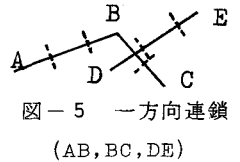
であらわされていると考える。ここで確率 μ_j はすべての単位割れ目について、等しく、独立であると仮定すれば、 \bar{n} 段階連結した割れ目数 $X_{\bar{n}}$ 、およびその確率 $\mu^{(\bar{n})}$ は、 \bar{n} 段階の確率母関数を $G_{\bar{n}}(s)$ として、

$$X_{\bar{n}} = X_0 (\mu^{(\bar{n})}) = X_0 (1 - G_{\bar{n}}(0)) = X_0 (1 - G(G_{\bar{n}-1}(0)))$$

$$G(s) = G_1(s) = \sum_{j=0}^{\infty} \mu_j s^j \quad (s \text{ は任意実数}) \quad \dots\dots (5)$$

とかける。また $\bar{\mu} = G'(1)$ とおくと、 $\bar{\mu} > 1$ では $\mu^{(\infty)} = \alpha_0$ 、つまり単位割れ目が無限に連結する確率はある値 α_0 ($0 < \alpha_0 \leq 1$)を持つが、 $\bar{\mu} \leq 1$ では $\mu^{(\infty)} = 0$ である。

つぎに、この理論によって実際の割れ目連続がどの程度評価しうるか実測割れ目系を用いて検討する。ここで、図-5のように、一つの割れ目があるものとし、一方向



のみに連続した割れ目、たとえば図中のAB, BC, DEを取り出したものを一方向連鎖、すべての連続を考えたものを多方向連鎖状態とよぶこととする。実測割れ目系を図-

6に示すが、これらは(a); 青森県竜飛岬凝灰岩、(b); 長野県上松付近花崗岩、(c); 神奈川県三保ダム付近の航空写真にみられるリニアメントである。これらをまず単位割れ目に分割するが、 l_0 をそれぞれ(a); 2.5cm、(b); 5.0cm、(c); 250mに設定した。これらの割れ目系について、一方向連鎖および多方向連鎖状態のそれぞれの場合について、分枝過程理論の適用性をみたものが、図-7, 8であり、符号(a), (b), (c)は、それぞれ図-6に対応している。計算に用いた μ_j 値は図-6から読みとつた。

図-7, 8の横軸は、段階数 \bar{n} に1を加えたものであり、縦軸は、各段階まで連続した割れ目数 $X_{\bar{n}}$ を表している。これらの

図は、段階数の大きな割れ目が減少している様子をよくあらわしている。また、分枝過程の理論が実測割れ目の連続性をよく

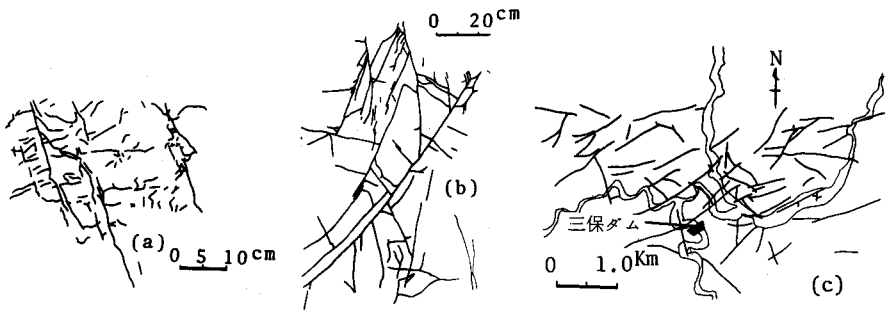


図-6 実測割れ目系 (a); 青森県竜飛岬凝灰岩、(b); 上松花崗岩、(c); 神奈川県三保ダム付近のリニアメント系

ただ図-8(b)図で、理論値と実測値がかなり異っているが、これは、用いた割れ目系が、図-6(b)にみられるように、閉ループの多い割れ目を含んでおり、分枝過程理論の適用が難しいことによると考えられる。この場合は、他の確率過程理論を導入する必要がある。ここで、この割れ目系がもし分枝過程に従うとすれば、 $\bar{\mu} = 1.1$ であり、 $\mu^{(\infty)}$ が存在し、その値は、(5)式より $\mu^{(\infty)} = 1 - G_{\infty}(0) = 0.39$ となる。しかし、このような閉ループを多く含む場合はあるにせよ、図-7, 8

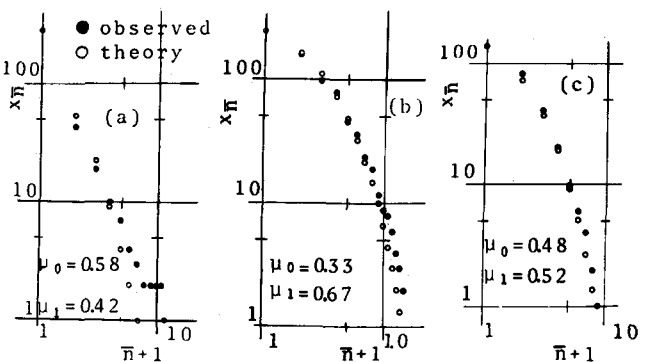


図-7 一方向連鎖の各段階割れ目数 (符号は図-6に同)

の結果は、分枝過程の理論によって二次元割れ目系の連続性が評価できることを示している。つぎに、確率 μ_j 値が、場所によってどのように異なるかを、簡単のため一方鎖状態について検討する。今まで述べた図-6の割れ目系では、 l_0 が各々異っており単純に比較はできない。そのため、上松花崗岩について、図-6(b)で示される地点から20~30^m離れた同じ花崗岩中の二点を選び、 l_0 を一定にして比較した。

その結果を図-9に示す。これらの μ は0.68, 0.67となり、図-6(b)の結果に比べてほぼ一致しているといえる。特に図-9(b)は、破砕帯中の割れ目についての測定であり、このことから、同一岩相岩盤内であれば、数十^mの範囲にわたって破砕帯中であつてもなくても、一方鎖状態は同じではないかという推測ができる。以上の割れ目連続性の検討により、岩盤中の割れ目連続が、単位割れ目長さを設定してやれば、連結確率 μ_j により評価しうるとい興味ある結果が得られた。また岩盤浸透流では、割れ目のうち、どれだけ浸透経路となりうるかは重要な点であるが、これも、割れ目の連続性から、必要な連結段階 \bar{n} を導入することにより統一的に評価しうることがわかった。こういった分枝モデルの性質で割れ目の連続性が評価できるということは割れ目構造、分布の把握に有力な手掛りとなろう。

あとがき

今回の研究により、岩盤割れ目が平行板間隙でモデル化でき、その連続性を考慮しなくとも良い場合には、割れ目幅分布を導入して岩盤の透水性が評価しうることがわかった。しかし、岩盤浸透流を考える上で、割れ目の連続性は重要な点であり、このことについて筆者らは、分枝過程の理論を導入し、二次元割れ目係については把握が可能であるとの知見を得た。まだ不十分な点も多く、たとえば今回単位割れ目長さ l_0 を任意としたが、今後岩盤破壊機構や岩質と関連づけて考える必要があり、また、閉ループを多く含んだ割れ目の処理にも研究の余地がある。これらを、三次元割れ目系における連続性の評価法や実際問題への応用手法の確立とあわせ、さらに研究してゆきたいと考える。

最後に、この研究を進めるにあたり、御指導賜った東京大学高橋裕教授、また、ていねいな御討論・御教示いただいた東京大学玉井信行助教授に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Ogata, S., Activity evaluation of fault in the basement terrain, 応用地質, vol. 7, No. 3, pp. 30-32, 1977
- 2) Rocha, M., Franciss, F., Determination of permeability in anisotropic rock masses from integral samples, Rock Mech., vol. 9, pp. 67-95, 1977
- 3) 渡辺邦夫・佐藤邦明, 岩盤浸透流の基礎的性質, 第22回水理講演会論文集, 1978

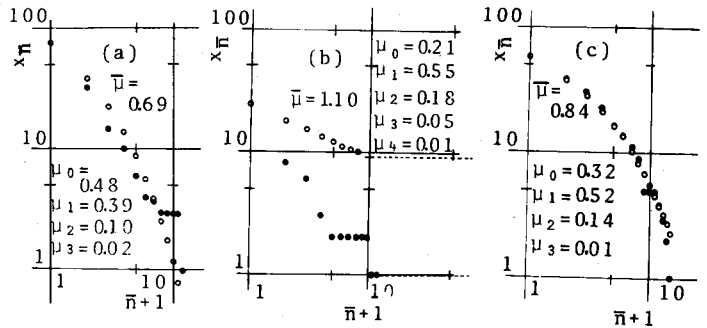


図-8 多方向連鎖の各段階割れ目数(記号は図-6に同)

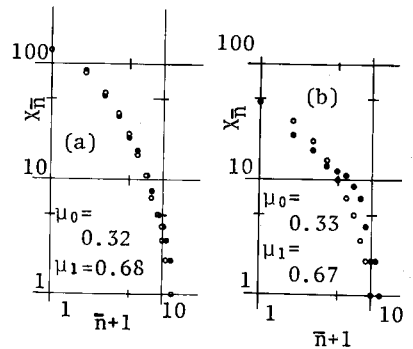


図-9 一方鎖確率 μ_i の地点比較
(b)は破砕帯中(上松花崗岩)

On some stochastic properties of cracks and these applications to
the permeability in rock masses

Kunio Watanabe
Kuniaki Sato
Faculty of Engineering,
Saitama University

The behaviors of seepage flow in fractured rock masses depend mainly on the fracture properties such as opening or spacing width, surface roughness of space walls, filling materials, distribution of cracks, etc.. In order to estimate the permeability in fractured rock, it is important that these properties mentioned above are evaluated quantitatively.

However, if the seepage flow in each crack can be assumed to be the laminar flow between two smooth parallel plates, we may appraise the permeability by finding the distribution of opening widths and directions of cracks in the rock. Concerning to the distribution of opening widths (t), the number of cracks between t and $t+\Delta t$ ($T_0 \leq t \leq T_A$) may be given by the equation, $N(t)\Delta t = Kt^{-m}\Delta t$, where $N(t)\Delta t$ is the number, K, m , the constants, T_0, T_A , the minimum and maximum opening width in the rock respectively. Adopting this equation, we can explain the nature of this distribution by means of two constants, and also if direction distribution is known by Rocha, M. et al²⁾ and authors³⁾, the permeability in the rock may be determined by the theory of permeability tensor and its eigen values.

To discuss more properly permeability, we must study some another properties of fracture system which are related to the seepage pass. Among them, the extension of each crack and the coalescence of cracks are important. In order to evaluate the continuity of cracks, we applied a branching process model which is one of the stochastic process model for the fracture system on the supposition that each crack is composed of "unit cracks" which have appropriate length l_0 for individual rock mass. As the result, it is found that this model expresses well the extension and coalescence properties for the families of two dimensional cracks observed in fields, and that the structure of crack system may be stochastic.