

亀裂性岩盤の透水性評価に関する一考察

PERMEABILITY EVALUATION OF FRACTURED ROCK FOUNDATIONS

神尾 重雄*・玉田 晟**・浦山真次郎***・解良 一夫****

By Shigeo KANO, Akira TAMADA, Shinjiro URAYAMA and Kazuo KERA

Rock foundation permeabilities are affected by many factors like kinds, geological classifications and crack conditions of rocks. Therefore, it is important to examine the relations between the above-mentioned factors and permeabilities in rock foundation. This paper shows the results of the studies over the relations between them by the theory of quantification, based on the observation of the recovered boring cores.

Keywords : permeabilities in fractured rock foundations, Lugeon value, method of quantification, the recovered boring cores

1. はじめに

亀裂性岩盤の透水性は岩盤中に存在する割れ目に依存し、割れ目の数、幅、方向および割れ目の方向分布、間隙幅分布、連続性といったものの関数で示されるといわれている¹⁾。ただし、岩盤中の浸透流の動きは、不連続面の影響を受けてかなり複雑となるため、透水性評価の定式化がきわめて難しい。現時点では、岩盤の透水性評価は、不連続面の影響を無視し、ルジオンテストの結果を等価な透水係数に置き換えて、ダルシー則を適用して行われるのが一般的である^{2)~5)}。そのため、亀裂性岩盤の透水性を的確に把握し、解析する方法の一例も早い確立が望まれている。それには、亀裂性岩盤の透水性評価を定式化する前に、まず、実用的な面からみて、どのような地質的要因に着目して岩盤の透水性を分類・評価すればよいかを把握しておくことも重要である^{6)、7)}。このような観点から、本論文では、ダムをはじめとする大型重要構造物の地質調査の場合には調査ボーリングが主体となることから、ボーリング・コアから得られる地質情

報をもとに亀裂性岩盤の透水性を的確にかつ容易に把握する方法について検討を試みたものである。

2. 検討内容

亀裂性岩盤の透水性評価を検討する場合には、岩盤中の割れ目が顕在化している方がより顕著に傾向が把握できると考えられる。そこで、本検討におけるメインのフィールドとして、A地点を選定した。A地点の地質は、基盤は中生代白亜紀に噴出したとされる流紋岩質凝灰岩を主体とし、これに花崗斑岩が貫入している。流紋岩質凝灰岩は、冷却節理の発達が著しく、その後の河川の急激な侵食に伴う除荷作用もあって、全体に20~40 mの深度まで割れ目が開口している。この開口割れ目に沿って酸化物による汚染や流入粘土がみられる。また、比較的新鮮な部分でも割れ目に灰色の粘土が挟在することが多いというのである。このA地点で調査ボーリング孔(孔径66 mm)を利用して実施された351ステージ(1ステージ長は5 m)におよぶルジオンテストの結果と、それらのステージにおけるボーリング・コアから岩盤の透水性と深いかかわり合いをもつと考えられる地質的要因を評価・測定して対比させようとしたものである。なお、ここで問題となるのが、どのような地質的要因に着目すればよいかということである。岩盤の透水性は、一般に

* 理修 水資源開発公団試験所第三試験課長

** 水資源開発公団味噌川ダム建設所所付

*** 正会員 工修 水資源開発公団試験所地質試験室長

**** 正会員 水資源開発公団滝沢ダム建設所設計第一係長
(〒368 秩父市下宮地町10-18)

割れ目間隔、割れ目の開口幅および充填物といった割れ目性状および岩片内の空隙（これは岩種により、かなり異なるといわれている）の影響を大きく受けると考えられる^{7,8)}。また、実用的な面から考えると、岩盤の透水性を分類・評価する地質的要因はボーリング・コアからの評価・測定が比較的容易な要因であることが望ましい。本検討は、亀裂性岩盤において岩盤の透水性、つまりはルジオン値と良い相関性をもつと考えられ、かつ、ボーリング・コアからの評価・測定が比較的容易な地質的要因である岩種、割れ目間隔、割れ目の開口幅および充填物に着目して、これらの地質的要因が基盤の透水性に及ぼす影響度について数量化理論を用いて解析した。さらに、この解析で得られた知見の他の亀裂性岩盤への適用性についても検討を行ったものである。

3. 数量化分析 I 類

いろいろな要因から、ある外的基準を説明ないしは予測する有力な方法の1つとして多変量解析法がある。なお、一口に多変量解析法といっても、その中には回帰分析法、判別分析法、数量化分析Ⅰ類、数量化分析Ⅱ類などさまざまな方法が含まれており、要因および外的基準が質的なものか量的なものかによって一般に図-1に示すような使い分けがなされている⁹⁾。

岩種、割れ目間隔、割れ目の開口幅および充填物といった質的な要因に関する情報に基づいて、ルジオン値という、いわゆる量的に測定された外的基準の値を説明あるいは予測しようとする今回の試みには、同図からわかるように数量化分析Ⅰ類の方法が最も適している。以下、この数量化分析Ⅰ類の理論の要点を説明する¹⁰⁾。

各サンプルについて、量的に測定された外的基準の値と、それとの関係を調べたい各質的な要因アイテムの力

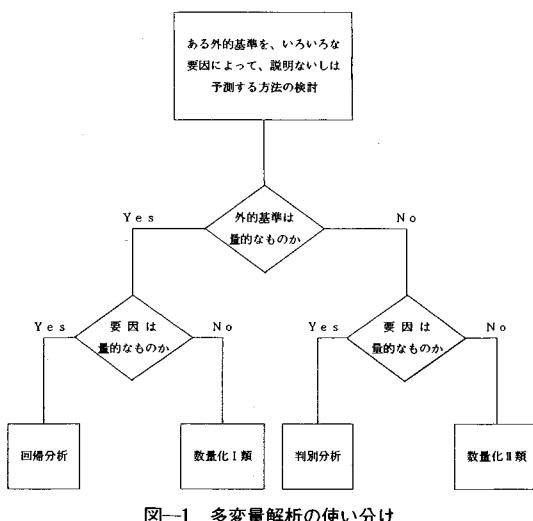


図-1 多変量解析の使い分け

テゴリーへの反応とが表-1のよう得られているとする。

i 番目のサンプルが各アイテムのどのカテゴリーに反応するかを表すために、次のようなダミー変数を導入する。

$$\delta_i(jk) = \begin{cases} 1 & \cdots i\text{番目のサンプルがアイテム } j \text{ の} \\ & \text{カテゴリー } k \text{ に反応するとき} \\ 0 & \cdots \text{反応しないとき} \end{cases}$$

各サンプルが各要因アイテムのどのカテゴリーに反応したかをもとに、外的基準の値を予測するためには、各要因のカテゴリーに対応するダミー変数の線形式を考える。

式(1)は、 i 番目のサンプルが反応したカテゴリーに対する係数 a_{jk} を選択して加えるというもので、これをそのサンプルの数量(評点)とする。 a_{jk} は、いうなればアイテム j のカテゴリー k に付与された数量(評点)である。サンプルの数量 Y_i により、外的基準の値 y_i を精度よく予測するには、

$$Q = \sum_{i=1}^n (y_i - Y_i)^2 = \sum_{i=1}^n \left(y_i - \sum_{j=1}^R \sum_{k=1}^{C_j} a_{jk} \delta_i(jk) \right)^2 \dots \dots \quad (2)$$

が最小となるような a_{jk} を定める必要がある。回帰分析の場合と同様に、 Q を各 a_{uv} で偏微分してゼロとおき、正規方程式を求めるとき、

$$\sum_{i=1}^R \sum_{k=1}^{Cj} f(uv, jk) a_{jk} = \sum_{i=1}^n y_i \delta_i(uv) \dots \dots \dots \quad (3)$$

$$(n \equiv 1, 2, \dots, C_m, \quad y \equiv 1, 2, \dots, B)$$

が得られる。各サンプルがおののおのの要因アイテムに対して、必ず1つだけのカテゴリーに反応するとすれば、

$$\prod^{c_j} \delta_i(jk) = 1 \quad (j=1, 2, \dots, R, \quad i=1, 2, \dots, n)$$

.....(4)

が成り立ち、正規方程式(3)の解は一意的には定まらない。これは、 $R-1$ 個のアイテム内のカテゴリーに与える数量 a_{jk} に原点の不定性があるためで、この不定性

表—1 数量化分析 I類のデータ

サンプル 番号	外的基準	アイテム1	アイテム2	...	アイテムn
		カテゴリー1 1,2,...,C ₁	カテゴリー2 1,2,...,C ₂	...	カテゴリーn 1,2,...,C _n
1	y ₁	○	○		○
2	y ₂		○	○	
3	y ₃	○		○	○
..	..				
..	..				
..	..				
..	..				
n	y _n		○	○	○

をなくすためには、たとえば $2 \sim R$ 番目の $R-1$ 個のアイテム内のそれぞれ1番目のカテゴリーに与える数量をゼロとおき、それを基準にしたときのカテゴリーの数量を求めれば良い。この場合予測値 Y_i は、

$$Y_i = 1/n \sum_{j=1}^R \sum_{k=1}^{C_j} a_{jk} n_{ik} + \sum_{j=1}^R \sum_{k=1}^{C_j} a_{jk} \delta_i(jk)$$

$$= C + \sum_{j=1}^R \sum_{k=1}^{C_j} a_{jk} \delta_i(jk) \quad (C: \text{定数項})$$

と書け、外的基準の値 y_i のダミー変数に対する重回帰モデルの形となっていることがわかる。なお、解析にあたっては各アイテム内のカテゴリーに付与する数量の平均値が零となるように、 a_{jk} を標準化しておく場合が多い。また、外的基準の値 y_i がどの程度よく予測されているかについては、回帰分析と同様に、観測値 y_i と予測値 Y_i との間の重相関係数 R あるいは、その2乗である R^2 により評価することができる。外的基準の値 y_i に対する各要因アイテムの影響の大きさについては、アイテム内のカテゴリーに付与された数量 a_{jk} の範囲あるいは、外的基準の値と数量化された要因アイテムとの間の偏相関係数により評価することができる。

4. 要因アイテムのカテゴリー区分

本検討では、ボーリング・コアから評価・測定する要因アイテムとして岩種、割れ目間隔、割れ目の開口幅および充填物の3要因を選定した。ここで重要なのが、これらの要因アイテムのカテゴリー区分の設定である。要因アイテムのカテゴリー区分の設定の仕方によっては、数量化解析の結果に大きな影響を与えることは広く一般に知られていることである。だが、現在のところ、最適なカテゴリー区分の設定の仕方については明確な指針が得られていない。そこで、本検討では、割れ目間隔、割れ目の開口幅および充填物といった要因アイテムのカテゴリー区分の設定に関しては、A地点の調査で用いられている区分基準をそのまま適用することとした。割れ目間隔の区分基準を表-2に、割れ目の開口幅および充填物の区分基準を表-3に示す。これらの表からわかるように、割れ目間隔はボーリング・コア形状により、割れ目の開口幅は割れ目面の色調（つまりは酸化汚染の程度）により評価しようとするものである。なお、ルジョンテストのステージ長が5mあるため、ステージ区間によっては割れ目面の色調について、評価区分の異なる割れ目がいくつか存在するというような状況も予想された。この場合に問題となるのが、そのステージ区間ににおける割れ目面の色調をどう評価するかということである。そこで、本検討においては、当該ステージ区間に存在する割れ目の割れ目面の色調が表-3中の隣接する2つの区分に評価される場合には、色調評価が過半を占め

表-2 A地点における割れ目間隔の区分基準

区分基準	試掘横坑壁面	
	ボーリング・コア	割れ目間隔
I		割れ目間隔 30cm以上
II		割れ目間隔 30~15cm
III		割れ目間隔 15~5cm
IV		割れ目間隔 5cm以下

表-3 A地点における割れ目開口幅および充填物の区分基準

区分基準	試掘横坑壁面		
	ボーリング・コア	充填物	割れ目面の色調
α	0~0.2mm	密着あるいは フィルム挿在	新鮮~緑色
β	0.2~1mm	砂状もしくは 粘土質挿在	緑色~淡黄色
γ	1~3mm	流入粘土挿在 あるいは 一部開口	黄色~褐色
δ	3mm以上	開口	褐色~赤褐色

表-4 A地点における亀裂性岩盤の透水性に関する調査結果の例

サンプル番号	ルジョン値	割れ目の開口幅 及び充填物				岩種					
		α	β	γ	δ	I	II	III	IV	泥炭質 凝灰岩	花崗 斑岩
		O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
1	10.8	O				O				O	
2	0.3	O					O				O
3	7.6		O				O			O	
4	101.8			O				O			O
5	34.5		O				O			O	

る区分で、その占める割合が半々であれば開口幅の大きい区分で代表させることにした。これ以外の場合については、本検討における評価対象から除外することにした。ただ、色調についての区分基準自体が、表-3からもわかるように、割れ目面の色調にある程度の範囲をもたせているため、1つのステージ区間の色調に評価の異なる割れ目がいくつか存在するというような状況は実際にはまれであった。そのため、少なくとも本検討においては、色調による評価は、かなりの客觀性をもって行うことができたと考えられる。なお、本検討のようにボーリング・コアから割れ目間隔、割れ目の開口幅および充填物といった割れ目性状を評価・測定する場合に重要なのが、ボーリング・コアから測定される割れ目性状が岩盤でのどのような割れ目状態に該当するのかを把握しておくことである。そのような観点から、試掘横坑壁面における

観察結果とボーリング・コアとの対比も行っている。これらの表には、参考までに、その対比から判明した対応関係も併記している。

参考までに、A 地点における亀裂性岩盤の透水性に関する調査結果の例を表-4 に示す。

5. 数量化分析結果および考察

数量化分析 I 類の理論を用いて、A 地点から得られたデータの統計分析を行った。その結果を表-5 に示す。

数量化理論によれば、外的基準 y_i に対する各要因アイテムの影響を測る尺度としては、まず、アイテム内のカテゴリーに対する数量 a_{jk} の最大値と最小値の差で定義される範囲の大きさがある。これは、この範囲の大きい要因ほど、どのカテゴリーに反応するかで予測値 Y_i が大きく異なることになり、それだけ外的基準に対する影響が大きいと考えられるからである。このほかに、外的基準 y_i と各要因アイテムとの偏相関係数も、各要因アイテムが及ぼす影響を測る尺度となる。この場合には、偏相関係数の値が 1 に近いほど、その影響の度合は大きいとされる。そして、この範囲の大きさと偏相関係数という 2 つの尺度によれば、“割れ目の開口幅および充填物”という要因アイテムが岩盤の透水性つまりはルジョン値に及ぼす影響は、他の要因アイテムである“岩種”および“割れ目間隔”に比べてかなり大きいことがわかる。また、“岩種”が岩盤の透水性に及ぼす影響は他の要因アイテムと比べて最も小さいことがわかる。数量化理論の教えるところによれば、ルジョン値の変動のうち、およそ 33 % (寄与率すなわち重相関係数 R の 2 乗、 $R^2 = 0.328$) が本検討で選定した“岩種”，“割れ目間隔”および“割れ目の開口幅および充填物”的要因アイテムにより説明される。また、要因アイテム間および外的基準との相関係数を以下に示す。

$$R = \begin{bmatrix} y & 1 & 2 & 3 \\ y & 1.000 & 0.567 & -0.004 & 0.205 \\ 1 & 0.567 & 1.000 & -0.143 & 0.358 \\ 2 & -0.004 & -0.143 & 1.000 & -0.239 \\ 3 & 0.205 & 0.358 & -0.239 & 1.000 \end{bmatrix}$$

表-5 数量化分析結果

アイテム	カテゴリー	度数	数量 a_{jk}	範囲	偏相関係数
割れ目の開口幅 および充填物	α	51	-19.485	95.859	0.545
	β	183	-11.908		
	γ	91	13.045		
	δ	26	76.374		
割れ目間隔	I	43	8.466	10.814	0.097
	II	165	-2.348		
	III	129	-0.397		
	IV	14	5.328		
岩種	流紋岩質 凝灰岩	212	0.686	1.719	0.022
	花崗斑岩	139	-1.033		

定数項 21.166 異相関係数 $R = 0.573$

ただし、 y ：外的基準値（この場合、ルジョン値）

1：要因アイテム “割れ目の開口幅および充填物”

2：要因アイテム “割れ目間隔”

3：要因アイテム “岩種”

ここでの y は外的基準の値つまりは “ルジョン値” を、1 は “割れ目の開口幅および充填物”，2 は “割れ目間隔”，3 は “岩種” という要因アイテムを意味している。そして、相関係数の値が 1 に近いほど強い相関関係があるとされる。同図によれば，“ルジョン値” と “割れ目の開口幅および充填物”との間には、比較的強い相関関係が認められる。一方，“ルジョン値” と “割れ目間隔” との間には相関関係は認められない。要因アイテム間の相関関係は、“割れ目の開口幅および充填物” と “岩種” との間に弱い相関関係が認められるだけである。

図-2 に各要因アイテム内のカテゴリーを組み合わせた場合に予測されるルジョン値（数量化分析 I 類でいうところの予測値 Y_i ）を示す。同図は、X 軸に “割れ目間隔” を、Y 軸に “予測されるルジョン値” を、Z 軸に “割れ目の開口幅および充填物” をとったものである。この図によれば、流紋岩質凝灰岩は花崗斑岩より若干予測されるルジョン値が高い。また、割れ目の開口幅および充填物は、岩種および割れ目間隔によらず、 $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow$

	流紋岩質凝灰岩				花崗斑岩			
	割れ目の開口幅及び充填物				割れ目の開口幅及び充填物			
	α	β	γ	δ	α	β	γ	δ
割 れ 目 I	10.8	18.4	43.4	106.7	9.1	16.7	41.6	105.0
II	0.0	7.6	32.5	95.9	0.0	5.9	30.8	94.2
III	2.0	9.5	34.5	97.8	0.3	7.8	32.8	96.1
IV	7.0	15.3	40.2	103.6	5.3	13.6	38.5	101.8

凡 例

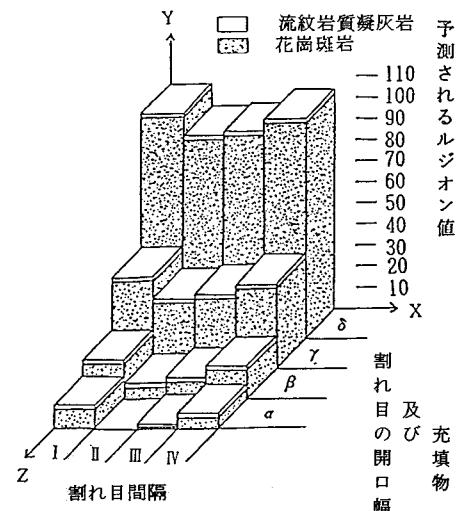


図-2 各要因アイテム内のカテゴリーの組合せにより予測されるルジョン値

$\gamma \rightarrow \delta$ となるに従い予測されるルジオン値は顕著に高くなる。割れ目間隔は、岩種および割れ目の開口幅および充填物によらず、I のときに予測されるルジオン値が最も高い。そして、II のときに最も低くなるが、II → III → IV となるに従い予測されるルジオン値は再び増大する。もし、割れ目の連続性や方向分布といった幾何学的状態が I, II, III, IV といった割れ目間隔のカテゴリーによらず、同じだとするならば、割れ目間隔が密になればなるほど岩盤の透水性は当然のことながら高くなることが予測される。ボーリング・コア観察からは、割れ目の幾何学的状態を把握することは不可能である。そのため、あくまでも推測の域をでないが、本解析結果のような現象が起きる原因としては、割れ目の幾何学的状態が、少なくとも I と他のカテゴリーの II, III, IV とでは異なることが考えられる。“ルジオン値”と“割れ目間隔”との間には相関関係が認められないというような結果が得られたのも、同様な理由によるものと考えられる。なお、著者らは、割れ目の幾何学的状態が亀裂性岩盤の透水性に与える影響を把握するための検討を、ボーリング・コア観察とは別の視点から行っている^{11), 12)}。この検討結果については、後で詳述する。

6. 亀裂性岩盤の透水性評価に関する検討

数量化分析 I 類による解析結果によれば、“割れ目の開口幅および充填物”という要因アイテムが岩盤の透水性つまりはルジオン値に及ぼす影響はきわめて大きく、そのカテゴリーが $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \gamma \rightarrow \delta$ となるに従って、岩種および割れ目間隔によらず、ルジオン値は顕著に高くなる。ここで問題となるのが、数量化分析では傾向はつかめるものの、データ自体のばらつきが大き過ぎて実用に耐えられないということはないかということである。図-3 に A 地点における割れ目の開口幅および充填物とルジオン値との関係を示す。

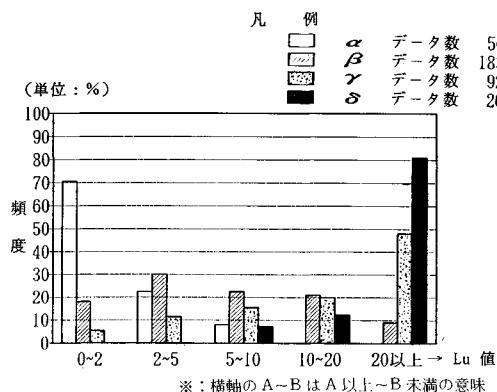


図-3 A 地点における割れ目の開口幅および充填物とルジオン値の関係

同図をみると限り、多少ばらつきはあるものの、 α は 0 ~ 2.0 Lu 未満の範囲に 70 % 以上が、 β は 2.0 ~ 20.0 Lu 未満の範囲に 70 % 以上が、 δ は 20.0 Lu 以上の範囲に 80.0 % 以上が集中するというように比較的良好な相関性が認められる。少なくとも A 地点においては、“割れ目の開口幅および充填物”という地質要因のみで、岩盤の透水性を的確に把握することが十分に可能である。そこで、この知見が、他の亀裂性岩盤でも適用できるか否かという、いわゆる適用性についての検証を行った。検証のためのフィールドとしては、同じ亀裂性岩盤でも、割れ目がそれほど顕在化していない地点として B 地点を、割れ目の識別がかなり困難な程度にまで岩盤が風化している地点として C 地点を選定した。B 地点と C 地点の地質であるが、B 地点は、後期三畳紀からジュラ紀と考えられている地層で、全体的にみると砂岩と粘板岩の互層であるが、砂岩層が一般に厚層をなし、粘板岩または砂岩と粘板岩の互層は比較的薄いという傾向がみられる。断層は層理面沿い、あるいは低角度で交わるものが多く、地層はこれらの断層により分断されて地塊状となっている。C 地点は中生代白亜紀から古第三紀に形成された粗粒黒雲母花崗岩からなる。花崗岩は風化がかなり進行しており、風化深度は尾根筋で 30 ~ 40 m、沢や谷部で 10 ~ 20 m となっている。花崗岩中の断層は破碎幅 1 m 以下のものがほとんどで大規模なものは存在しない。また、亀裂に富んだ流紋岩岩脈もしくは粗粒玄武岩が頻繁に貫入するゾーンがある。このように、A 地点、B 地点および C 地点は同じ亀裂性岩盤といつても地質状況が異なる。そのため、B 地点および C 地点の調査で用いられている割れ目の開口幅および充填物の区分基準も、当然のことながら若干異なる。表-6 に B 地点および C 地点の調査で用いられている割れ目の開口幅および充填物の区分基準を示す。

そこで、B 地点および C 地点の各フィールドで調査

表-6 B 地点および C 地点における割れ目の開口幅および充填物の区分基準

区分基準	B 地点	C 地点
	ボーリング・コア	ボーリング・コア
α	割れ目に沿う風化や 挟雜物なく密着	ほとんど褐色化が 見られない
β	僅かに風化変質、 または粘土を挟む	所々褐色化または 綠泥石化が見られる
γ	割れ目は少し開口し、多 量の粘土を挟むか、割れ 目沿いに風化が進行	著しい褐色化
δ	割れ目は大きく開口し、 著しく風化変質、または 挟雜物多し	割れ目状態判定不能 (コアはスライム化)

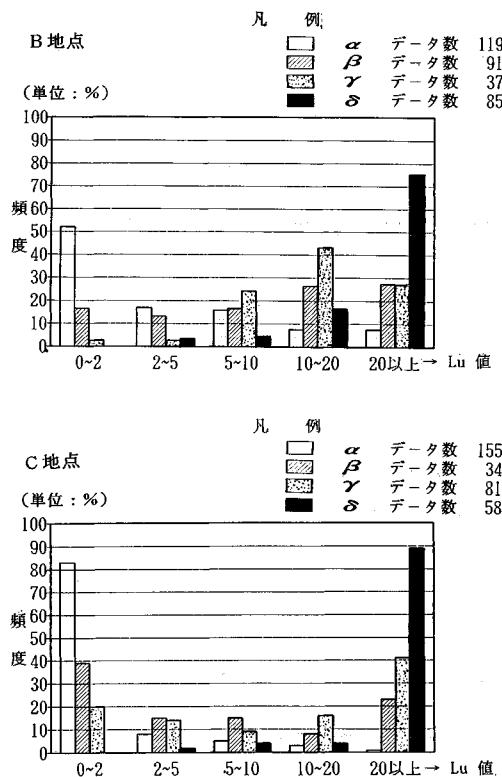


図-4 B 地点および C 地点における割れ目の開口幅および充填物とルジオン値の関係

ボーリング孔を利用して実施されたルジオンテストの結果（ステージ数は B 地点では 332 ステージ、C 地点では 328 ステージ）と、それらのステージのボーリング・コアから表-6 の区分基準に基づいて評価・測定された割れ目の開口幅および充填物を対比させることとした。割れ目の開口幅および充填物とルジオン値を対比させた結果を図-4 に示す。

同図によると、B 地点では α は 2.0 Lu 未満の範囲に 50 % 以上が、2.0~20.0 Lu 未満の範囲に β は 60 % 近くが、 γ は 70 % 近くが、 δ は 20.0 Lu 以上の範囲に 70.0 % 以上が集中している。C 地点では 2.0 Lu 未満の範囲に α は 80 % 以上が、 β は 40 % 近くが、20.0 Lu 以上の範囲に γ は 40 % 以上が、 δ は 90 % 近くが集中している。このように、B 地点および C 地点とも A 地点と同様に、割れ目の開口幅および充填物が $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \gamma \rightarrow \delta$ となるに従いルジオン値も高くなるという傾向が顕著に認められる。以上の検証結果から、亀裂性岩盤の場合には、割れ目の開口幅および充填物という地質的要因を分類・評価することで、データ自体のばらつきを加味しても、ボーリング・コアから透水性を的確に把握することが十分可能であるといえる。

7. 割れ目の幾何学的状態が与える影響について

ボーリング・コア観察からは、既述したように、割れ目の連続性や方向分布といった幾何学的状態を把握することは不可能である。しかし、亀裂性岩盤の透水性を的確に把握するためには、この割れ目の幾何学的状態が与える影響を無視することはできない¹⁾。実際、今回の数量化分析による解析でも、割れ目の幾何学的状態を考慮しないと説明できないような現象、つまり、割れ目間隔が密になっても必ずしも岩盤の透水性は高くならないというような現象がみられた。そこで、B 地点において、割れ目間隔を除いては、岩種、割れ目の開口幅と充填物およびグラウチングによる岩盤の透水性の改良程度がほとんど変わらない 2 つのブロック ($6\text{m} \times 6\text{m}$) を選定し、仕上げ掘削後（掘削深度 0.5 m）の掘削面における長さ 10 cm 以上の割れ目へのセメントミルクの充填状況を目視により観察することで、割れ目の幾何学的状態が亀裂性岩盤の透水性に与える影響について検討することとした。選定した 2 つのブロックを B-1 および B-2 とする。これらブロックを構成する岩種は砂岩のみであり、B-1 は割れ目間隔の区分基準でいえばⅢ に、B-2 はⅠ ないしはⅡ に該当するブロックといえる。B-1 および

表-7 B-1 および B-2 におけるグラウチングの施工パターン

ブロックNo.	表面処理方法	注入区間長	基準孔配列	注入圧力	注入完了基準	注入材料
B-1	8cmのスチール ファイバーコン クリートの吹付け り。 グラウチングの 施工後に仕上げ 削削として地表 から 0.5m 以後を 残す。	地表から 0.5m 以後の 部分	4次孔まで とし、以降は 追加孔。	最高注入圧力 は、注入量が $1\text{L}/\text{min}\cdot\text{m}^2$ になるまでは $1.0\text{kPa}/\text{cm}^2$ 、 以降は $2.0\text{kPa}/\text{cm}^2$ とする。	注入量が $0.2\text{L}/\text{min}\cdot\text{m}^2$ になってから 30分以上ダメ 押し。	高炉セメント セメント混和剤 (セメント量の 0.25%)
B-2	3.0m		3次孔まで とし、以降は 追加孔。			

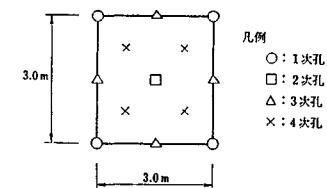


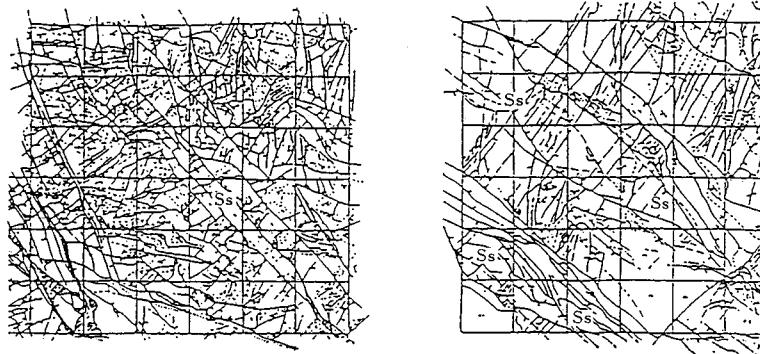
表-8 B-1 および B-2 におけるグラウチング注入実績

当該 掘削面 ブロック	岩種	割れ目 間隔	割れ目の 開口幅及 び充填物	平均限界 圧力 (kPa/cm ²)	次 数	注入孔数	平均ルジ オン値 (Lu)	平均セメ ント量 (kg/m)
B-1	砂岩	Ⅲ	γ	1.1	1 次	8 孔	126.9	310.0
					2 次	6 孔	35.1	164.8
					3 次	14 孔	62.5	122.7
					4 次	21 孔	38.5	95.8
					5 次	17 孔	5.4	13.1
					全 体	66 孔		112.4
B-2	砂岩	Ⅰ~Ⅱ	γ	1.1	1 次	2 孔	232.7	322.3
					2 次	4 孔	94.4	188.8
					3 次	6 孔	99.4	113.1
					4 次	2 孔	4.3	12.8
					全 体	14 孔		150.3

B-1

B-2

仕上げ掘削面における割れ目の状況



仕上げ掘削面におけるセメントミルクにより充填された割れ目の分布状況

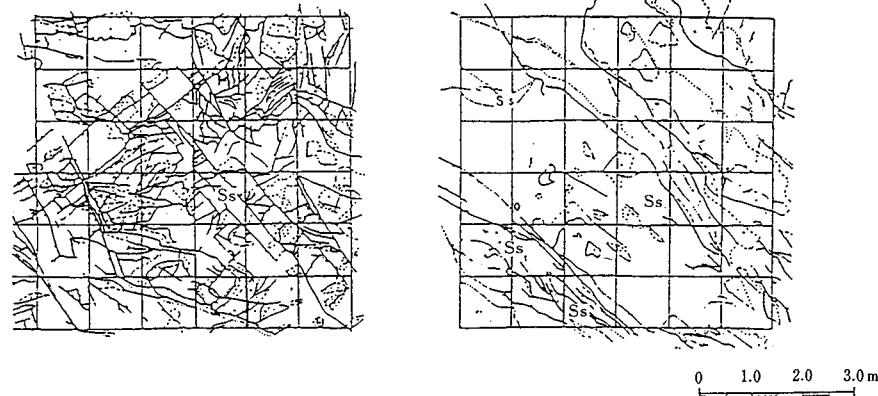


図-5 B-1 および B-2 の仕上げ掘削面での割れ目へのセメントミルクによる充填状況のスケッチ

B-2におけるグラウチングの施工パターンを表-7に示す。

同表からわかるように、B-1では4次孔までを、B-2では3次孔までを基準孔配置とし、基準孔の注入状況により追加孔を施工することになっている以外の注入仕様は同じである。B-1およびB-2におけるグラウチング注入実績を表-8に示す。B-1は一部5次孔まで、B-2は一部4次孔まで施工することでおのおの最終次数における平均ルジオン値で5.4 Lu, 4.3 Luと両ブロックとも、ほぼ同程度にまで透水性が改良されている。

さて、このB-1およびB-2の仕上げ掘削面における割れ目について、セメントミルクによる充填の有無に着目して作成したスケッチを図-5に示す。

このスケッチをもとに、長さ10cm以上の割れ目について、割れ目の走向と長さ、セメントミルクにより充填された割れ目の走向と長さ、走向ごとのセメントミルクによる割れ目の充填率をまとめたものを図-6に示す。図中の扇形は当該走向における割れ目の個数を、白

丸は割れ目の平均長さを示している。なお、割れ目の長さは実測によるが、割れ目が交差、分岐しているものについては、交差・分岐点で割れ目が別個のものになっているものとして解析している。また、走向の基準軸としては河川との直交方向をとったが、この方向はN20°Wにあたる。同図によると、B-1では、分布頻度の卓越している走向の割れ目が、他の走向の割れ目よりもセメントミルクにより充填される傾向が認められる。ただし、他の走向の割れ目にもセメントミルクは万遍なく充填されている。一方、B-2では分布頻度に関係なく、割れ目の平均長さの長い走向の割れ目がセメントミルクにより充填される傾向が認められる。また、セメントミルクの充填された割れ目におけるセメントミルク幅と割れ目の平均長さとの関係をまとめたものを図-7に示す。この図から、割れ目間隔によらず、割れ目の長さが長いものほど、その割れ目に充填されるセメントミルク幅も大きいという傾向がみられる。また、その傾向はB-1よりもB-2の方がより顕著である。以上のようないくつかの割れ目

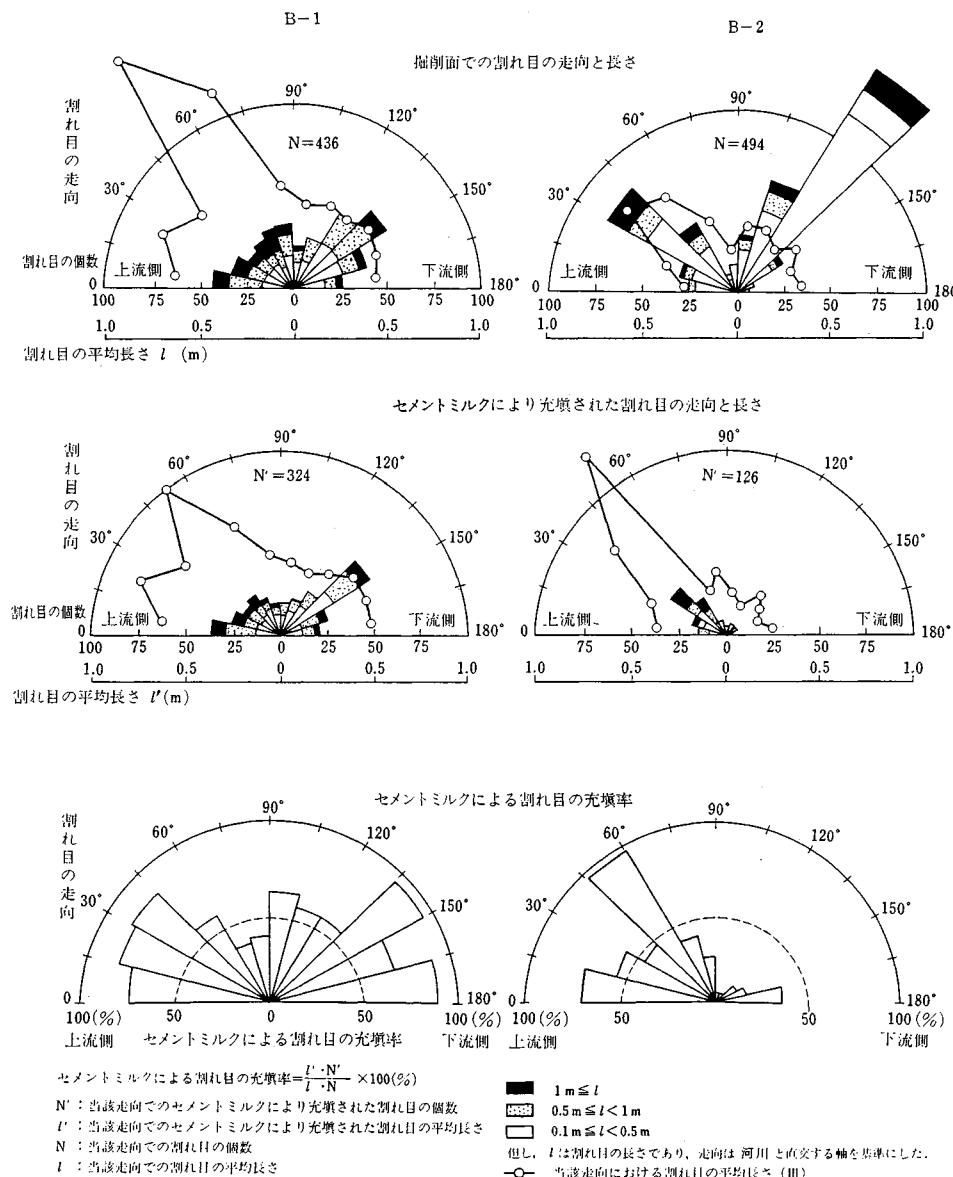


図-6 掘削面ブロックにおける割れ目の走向別分布状況および平均長さとセメントミルクの充填状況

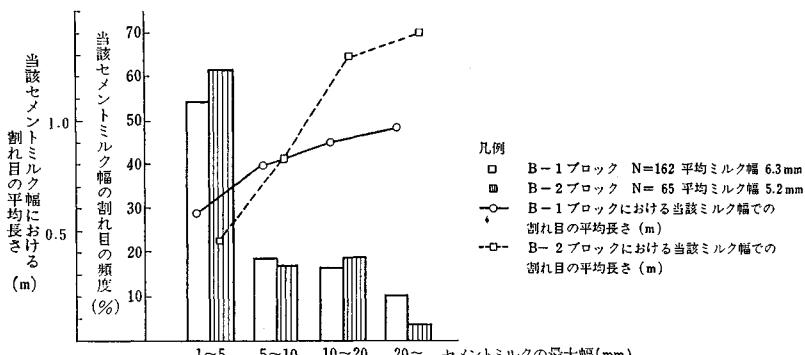


図-7 セメントミルクの充填された割れ目におけるセメントミルク幅と割れ目の平均長さとの関係

へのセメントミルクの充填状況から、亀裂性岩盤の透水性は、連続性の卓越した割れ目が存在する場合には、その分布頻度つまりは割れ目間隔によらず、その連続性の卓越した割れ目の影響を強く受ける。また、それほど卓越した連続性のある割れ目が存在しない場合には、割れ目間隔の影響を受けると考えられる。一方、割れ目の開口幅および充填物は、セメントミルク幅と何らかの相関性があると推定されることと、図-7のセメントミルク幅と割れ目の連続性との関係からみて、割れ目の連続性もある程度評価しているものと考えられる。今回の数量化分析で、割れ目間隔よりも、割れ目の開口幅および充填物の方が亀裂性岩盤の透水性を的確に評価できるという結果が得られたのも、これを裏付けているものと考えられる。

8. 結論

本研究では、ボーリング・コア観察により得られる地質情報をもとに、亀裂性岩盤の透水性を実用的な面からの確かつ容易に把握する方法について主として数量化理論を用いて検討した。得られた結論を要約して以下に示す。

(1) 数量化分析によって、A地点での岩種、割れ目間隔、割れ目の開口幅および充填物という各種要因が、亀裂性岩盤の透水性に与える影響度合について定量的な把握ができた。その分析結果によれば、少なくともA地点においては、割れ目の開口幅および充填物が与える影響度合はきわめて大きく、岩種および割れ目間隔によらず、 $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \gamma \rightarrow \delta$ となるに従いルジオン値も高くなることがわかった。

(2) 割れ目がそれほど顕在化していないくとも、割れ目の開口幅および充填物という地質的要因を分類・評価することで、データ自体のばらつきはあるものの、亀裂性岩盤の透水性を実用的な面からの確かつ容易に把握することが可能である。

(3) 割れ目間隔と岩盤の透水性との関係についていえば、割れ目間隔が密になっても透水性は必ずしも高くならない。これは、連続性の卓越した割れ目が存在する場合には、連続性の卓越した割れ目は、その割れ目間隔によらず、亀裂性岩盤の透水性に大きな影響を与えるためと推定される。

なお、本研究では、要因アイテムのカテゴリー区分の設定に関する検討は行っていない。しかし、このカテゴリー区分の設定の仕方は、数量化分析に限らず、亀裂性

岩盤の透水性を評価するうえでも大きな影響を与えるものと考えられる。今後は、このカテゴリー区分の設定の仕方を検討していく必要がある。また、本研究では、同一開口幅の割れ目内の地下水の流動は同一で同一色調になることを前提として、ボーリング・コアにおける割れ目面の色調から割れ目の開口幅を評価している。しかし、この前提については、地下水による風化、熱水による溶解などの場合でも、同一の開口幅の割れ目であれば同一の色調を示すかのかということも含めて、まだ十分な検討・証明がなされていないのが現状である。今後、検討していかなければならない重要な課題の1つといえる。

最後に、今後の研究展望であるが、地質状況の異なるさまざまな亀裂性岩盤をフィールドとして、さらに同様の検討を重ねていくことで、亀裂性岩盤の透水性評価方法の確立を目指したいと考えている。

参考文献

- たとえば、Rocha, M. and Francis, F. : Determination of permeability in anisotropic rock masses from integral samples, Rock Mech., Vol. 9, pp. 67~93, 1977.
- 建設省河川局開発課監修：ルジオンテスト技術指針・同解説、(財)国土開発技術センター、1984年6月。
- 桑原啓三：ルジオンテスト施工指針（案）の検討、建設省土木研究所資料、第1907号、pp.11~19、1983年3月。
- 松本徳久・山口嘉一・弘末文紀：ルジオンテストの各種境界条件下での精度と結果の解釈、建設省土木研究所資料、第2518号、pp.4~8、1987年3月。
- Lugeon, M. : Barrages et geologie, Dunod, Paris, 1933.
- 中村康夫：ボーリングに伴う情報—水の情報—、建設省土木研究所資料、第2221号、pp.99~112、1985年3月。
- 本島 熟：地下発電所の空洞掘削に伴う周辺岩盤における透水度の変化に関する考察、電力中央研究所報告、399009、26 p., 1979.
- 神尾重雄・浦山真次郎・玉田 崑・解良一夫：ボーリング・コアからみた基盤の透水特性、第22回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.141~145、1990。
- 田中 豊・脇本和昌：多変量統計解析法、現代数学社、序文、1987。
- 前掲9), pp.139~151.
- 神尾重雄・斎藤明朗・解良一夫：掘削面でのミルク充填状況よりみたグラウチング効果に関する基礎的考察、第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.86~90、1989。
- 神尾重雄・斎藤明朗・浦山真次郎・解良一夫：掘削面でのミルク充填状況よりみたグラウチング効果に関する基礎的考察、ダム技術、No.42, pp.49~57, 1990年3月。

(1990.6.12・受付)