

## (32) 地下空洞周辺岩盤の割れ目の連続性と透水性に関する実験的考察

東京大学 工学部

同

同

清水建設

小島 圭二

横井 一秀

西村 毅

江戸川修一

はじめに

ここでは、地下空洞周辺岩盤中の地下水の挙動を予測するために、岩盤の透水モデルを作成するに当って、割れ目の連続の程度が周辺岩盤の透水性とどのような関係にあるかを、割れ目系モデルに、導電性インクを使った電気模型実験により検討する。

### 1. 割れ目系の透水性に関する実験

#### 1.1 割れ目系モデル

電気模型実験に用いる割れ目系モデルは、西村・小島(1985)の方法により、現地計測で得られた各卓越割れ目群の割れ目密度および長さの確率分布にもとづいて、モンテカルロ法により合成、作成した。これは、コンピュータ出力を、ペンに導電性インクを使用して、XYレコーダで記録させたものである。地質断面は、後述する実験条件にあわせて、水平断面としてある。また個々の割れ目の透水性を同じにするため、割れ目を表わす線の太さは全て一定としてある。図1、図2は、このようにして得られた、ある花こう岩地域の割れ目系モデルの一例である。

#### 1.2 電気模型実験

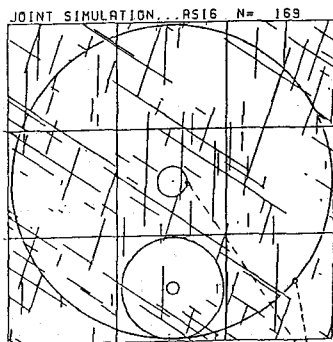
地下水流れに関する電気模型実験は、良く知られているように、ダルシー則とオーム則との対応性を利用したものである。透水係数 $K$ は、電気比抵抗の逆数 $1/\rho$ と対応している。 $1/\rho = L/RA$  ( $R$ :電気比抵抗、 $L$ :抵抗の長さ、 $A$ :抵抗断面積)であるが、割れ目系モデルではペンで書いた線の厚みは測定できないため、 $A$ 従って $1/\rho$ は直接決定できない。しかし、 $A$ は、割れ目系モデル各線のばらつきが、図3のヒストグラムで、ほぼ10%程度の標準誤差におさまることから、実用上は一定と考えられるので、 $K$ はほぼ $L/R$ に対応する。

模型実験では、岩盤の平均的な透水係数は、図2中に示す金属環と、地下空洞に相当する中心の電極との間の抵抗 $R$ を測定して得られる。ここでは、簡単のため、所定の深度での、周辺岩盤から地下空洞への定常流、平面流れを想定して、実験工程を簡略化した。これは同時に、割れ目自体の深度依存性の影響を除いたことになる。



密度 $1.57(m^{-1})$ , 連続率0.98

図-1 電気模型で用いた割れ目モデル (GrG)



電極

密度 $0.17(m^{-1})$ , 連続率0.30

図-2 大小のブロックと電極 (GrG)

### 2. 割れ目系の性状と透水性

## 2. 1 割れ目系の透水性を支配する要因

岩盤の透水性は、主として割れ目自体の透水性（深度に依存して変化する開口幅や割れ目の性状など）と割れ目系の分布（方向、密度および長さなど）とに支配される。前者は深度が大きい場合、所定の深さでは、ほぼ同じとすると、割れ目系が作る、割れ目の連続性が透水性を支配すると考えられる。

ここでは、岩盤周辺から地下空洞まで、どれだけの割れ目がつながっているかを、連続率で表現した。連続率は、図1、図2のような岩盤において、この範囲に存在する割れ目の合計長さで、中央の地下空洞から周囲まで連続している割れ目の合計長さを割った値である。

## 2. 2 透水係数の不均質性

図4は、連続率と割れ目密度との関係を示したものである。これは、ある花こう岩地域での現地計測によって得られた表1の値を用い、その密度だけを種々変えて、いくつかの割れ目系モデルを作成し、それらの連続率を計算して得られたものである。割れ目密度を単位面積中に含まれる割れ目長さの合計で表すと、それが $0.5 \text{ m}^{-1}$ 程度を越えると急に連続率がよくなることが認められる。図5は、1.2 で述べた方法で電気比抵抗の測定をおこない、図4と同じモデルを使って、割れ目密度と岩盤の透水性との関係を図示したものである。割れ目密度 $0.6 \text{ m}^{-1}$ 程度を境にして透水性(L/R)の増加率が異なる。図4と比較すると、この値は連続率が100 %に近づく割れ目密度とほぼ一致する。このように、ある限界割れ目密度以下では連続率が、それ以上では密度が、透水性を左右しているものと思われる。割れ目岩盤全体としての平均的な透水性は、一般には、ルジオン試験のような局所的な透水試験から推定される。電気模型を用いて、このような局所透水性(KL)から、全体の透水性(KM)を求めることを試みた。図2のように、岩盤をいくつかの小ブロックに分割し、より小さな金属環と中心の電極（ボーリング孔などに相当）とを用いて、この間の抵抗を測定し、これをKLとみなした。図6は、図4と同じモデルで、KLとKMの比が割れ目密度によってどう異なるかを示す。割れ目密度が小さい場合、KL/KM は大きく

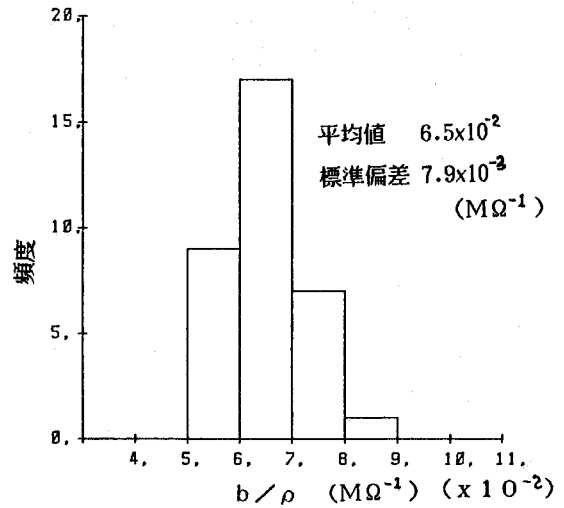


図-3 電気模型実験に用いる線の $b/\rho$ の分布

表-1 GrG地域での実測結果

|         |        |
|---------|--------|
| 平均割れ目長さ | 6.92m  |
| 卓越方向    | 頻度 (%) |
| =====   |        |
| N2E34E  | 38     |
| N18E38W | 31     |
| N66W86E | 31     |

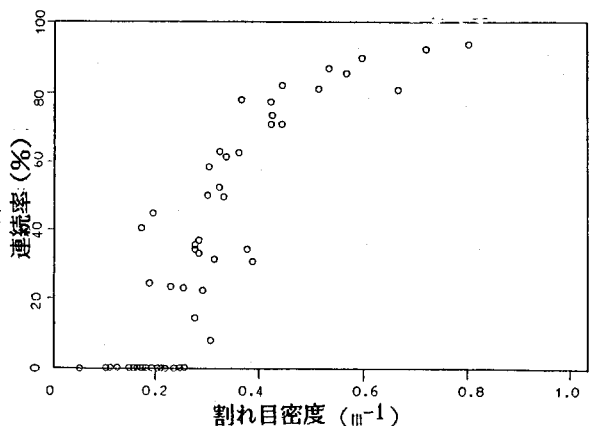


図-4 割れ目密度と連続率の関係 (GrG)

ばらつき、○印で示した、各密度毎のKLの対数平均値は、全体のそれと一致しない。一方割れ目密度が、 $0.6 \sim 0.7 \text{ m}^{-1}$  以上では、両者は一致しKLのばらつきも小さい。この領域では、KLを平均してKMを推定することができる。また、岩盤も比較的均質と見なすことができる。表2は、同様な花こう岩地域でルゾン試験による透水係数KLを用いて、その対数平均KMを求め、均質等方体として岩盤をモデル化し、地下空洞への湧水量をFEMにより計算し、実測値と比較した一例である（江戸川 1984）。実際の岩盤は、模型実験の条件とは異なるが、この地域の割れ目密度は  $2 \text{ m}^{-1}$  程度であり、十分に均質体とみなしてよい領域に入る。計算値と実測値とが良好な対応を示していることは、この平均化が妥当なものであり、電気模型実験の結果を支持するものといえよう。

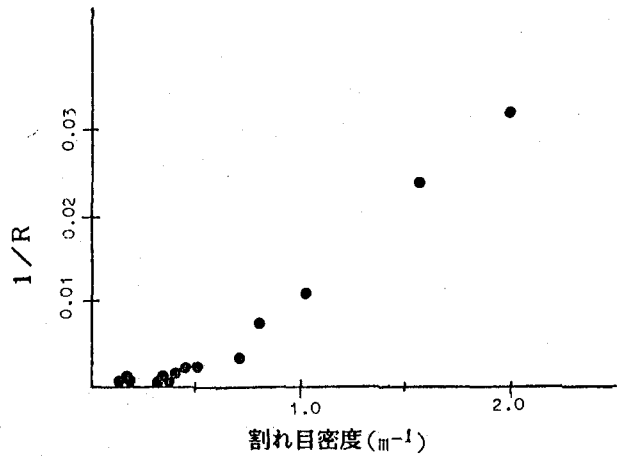


図-5 電気模型実験での割れ目密度と  $1/R$  の関係 (Gr G)

### 2.3 透水係数の異方性と割れ目系

ここでは電気模型を用いて、図7のように中心の電極と、周囲の大きな円上にもうけた各方向の電極との間の抵抗を測定し、透水係数の異方性の計測を試みた。異方性を表現するため、各方向ごとの透水性の大きさを中心からの長さで示した。中央の矢印は、卓越割れ目系から求めた透水係数テンソルより計算した最大透水係数  $K_1$  と最小透水係数  $K_2$  である。異方性比は  $K_1/K_2$  で表される。上の図は、割れ目密度が  $0.50 \text{ m}^{-1}$  であり、異方性が強いというよりも、不均質である。方向ごとの透水係数のちがいは、水みちの分布に大きく依存している。下の図は、割れ目密度が  $1.98 \text{ m}^{-1}$  である。透水性には多少の異方性が存在する。異方性比は 1.3 程度である。また、図中対応する割れ目系モデルを示す。透水係数テンソルから求めた異方性比は 2.51 であり、はるかに大きい。これは、個々の割れ目が無限の長さを持つと仮定しているため、異方性が強調されすぎるものと思われる。表3には花こう岩地域における、3方向のボーリング孔で透水試験をおこない、異方性の程度を実測

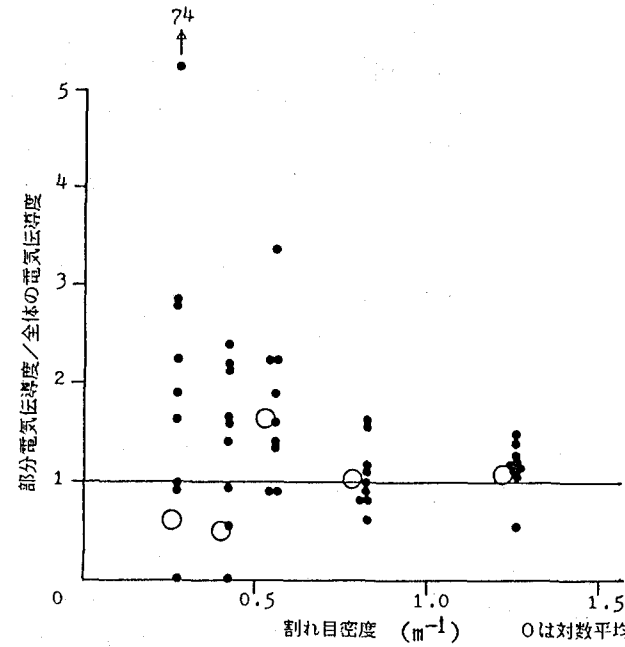


図-6 局所的な透水係数の平均値で岩盤全体の透水係数を推定できる割れ目密度の限界 (Gr G)

表-2 平均透水係数による湧水量の計算値と実測値との比較 (Gr G)

|     |        | 算術計算                  | 対数平均                  | 最大値                  | 実測値 |
|-----|--------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-----|
| 平均値 | cm/sec | $4.70 \times 10^{-5}$ | $1.05 \times 10^{-6}$ | $1.9 \times 10^{-3}$ |     |
| 流速  | m/day  | $7.78 \times 10^{-2}$ | $1.74 \times 10^{-3}$ | 3.14                 |     |
| 湧水量 | l/day  | 421                   | 9.4                   | $1.7 \times 10^3$    | 7.5 |

した例を示す。これから計算した異方性比は1.52、割れ目系から求めた透水係数テンソルによる異方性比は3.25、また割れ目密度は  $2 \sim 3 \text{ m}^{-1}$  であり、模型実験の傾向と良く一致する。いずれにしても、岩盤の透水性のばらつきを考えれば、割れ目密度が大きい領域では、ほぼ等方な岩盤としてモデル化しても大差はないであろう。

#### まとめ

割れ目系岩盤の透水性のモデル化を電気模型実験により考察した。割れ目密度がある値を越えると、岩盤は透水性に関して均質等方体に急に近づく。割れ目密度がそれ以下の場合には、割れ目系を水みちとしたモデルが必要となる。個々の割れ目の性状が同じ場合、この境界の割れ目密度は、割れ目の連続率と密接な関係がある。連続率は、割れ目密度の他に、割れ目長さ及び、卓越方向などにより変化する。日本のように割れ目の多い地域では、前者は一般の節理系岩盤に、後者は断層・破砕帯が問題になる岩盤に適用されよう。この境界密度は、岩盤の透水性モデルにどちらを用いるかの判断のよりどころを与えるものといえよう。

#### 参考文献

- 江戸川 修一 (1984) 東京大学工学部資源開発工学科卒論
- 西村 毅, 小島 圭二 (1985) 第17回岩盤力学に関するシンポジウム集 土木学会
- Hudson, J.A., et al (1980) Int. Jour. Rock Mech. Min. sci. & Geomech. Abst., Vol. 17
- Sundaram, P.N., et al (1983) Geotechnical Testing Journal, Vol. 6, No. 1

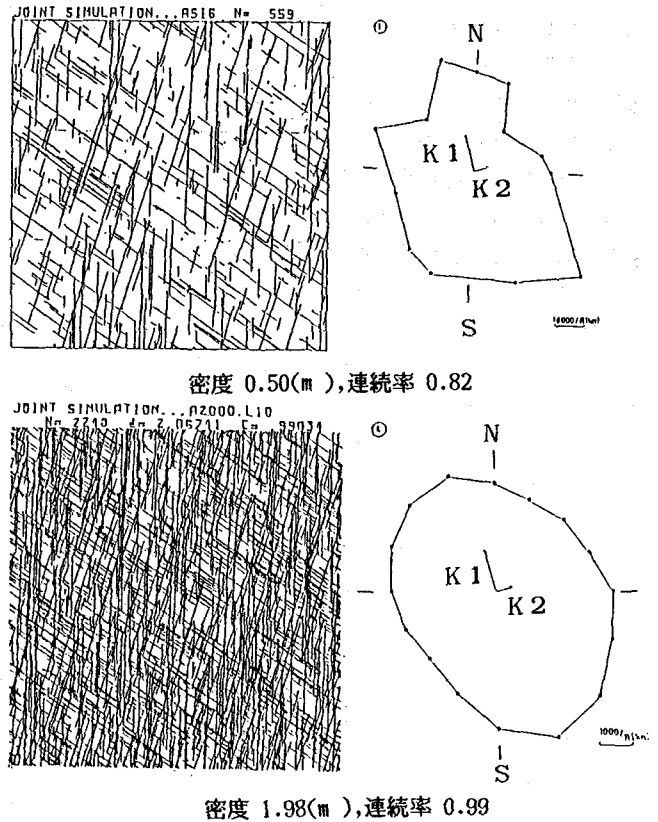


図-7 異方性比 ( $K_1/K_2$ ) と割れ目密度  
(それぞれ右図中の  $K_1, K_2$  のベクトルは計算による主透水係数) ( $G_r G$ )

表-3 3方向のボーリング孔の平均透水係数 ( $G_r B$ )

|                    | 平均透水係数 ( $\text{cm/s}$ ) |
|--------------------|--------------------------|
| 垂直ボーリング (30m x 3)  | $1.68 \times 10^{-6}$    |
| 水平ボーリングA (40 x 6)  | $3.80 \times 10^{-6}$    |
| 水平ボーリングB (30 x 30) | $2.38 \times 10^{-6}$    |

A: N-S 方向 B: E-W 方向

(32) ELECTRIC MODEL FOR THE PERMEABILITY OF  
FRACTURE SYSTEM AROUND UNDERGROUND CAVERN

KOJIMA Keiji\*, YOKOI Kazuhide\*  
NISHIMURA Tsuyoshi\* and EDOGAWA Shuuichi\*\*

The preliminary results of electric model experiment are described to make permeability model of fractured rock mass for the prediction of behavior of hydraulic flow through fracture system around rock cavern.

The fracture system is printed out by XY recorder with electrically conductive ink based on the data obtained from field survey.

The relations between heterogeneity and anisotropy of permeability, and density, continuity and direction of dominant fractures are discussed here from the results of this experiment.

\* Dept. Mineral Development Eng. The University of Tokyo, Tokyo, JAPAN  
\*\* Shimizu construction co. Tokyo, JAPAN